

Treball de Fi de Grau/Màster

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Estudi sobre les propietats mecàniques de peces fabricades per DLP mitjançant el mètode dels elements finits

MEMÒRIA

Autor: Guim Pedrero i Tobella
Director: Miquel Casafont i Ribera
Convocatòria: Febrer de 2019



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Aquest Treball de Fi de Grau busca explicar les anisotropies de les provetes fabricades amb la tecnologia del *Digital Light Processing* (DLP) que van ser observades en estudis anteriors. Per fer-ho s'han definit una sèrie de models matemàtics extrets de la recerca bibliogràfica que busquen explicar els fenòmens de solidificació i obtenció de les propietats mecàniques del material estudiat; s'ha analitzat el sistema de projecció que utilitza la màquina de fabricació; s'han realitzat mesures de la rugositat de mostres fabricades utilitzant la tecnologia DLP per relacionar-les posteriorment amb les anàlisis del sistema de projecció; s'han realitzat uns assajos experimentals per tal de caracteritzar les propietats mecàniques del material amb què es treballa, i finalment s'han dut a terme simulacions utilitzant totes les dades, els models i el coneixement obtinguts durant aquest treball.

L'objectiu principal de l'estudi no s'aconsegueix complir, ja que amb els models emprats no és possible explicar l'anisotropia observada als estudis anteriors. Tot i això, sí que s'aconsegueix explicar l'efecte del temps d'exposició en les propietats mecàniques de les peces fabricades. Amb l'anàlisi del sistema de projecció s'observen diversos factors que no es van tenir en compte a l'hora de fer els assajos anteriors i poden ser els causants de les diferències observades entre les propietats mecàniques de les diferents direccions. Per tant caldria repetir aquests assajos per tal de poder afirmar que el material és realment anisòtrop.

Sumari

SUMARI	5
1. GLOSSARI	7
2. PREFACI	9
2.1. Motivació	9
2.2. Objectius del projecte	9
2.3. Abast del projecte	10
2.4. Antecedents	11
3. FABRICACIÓ ADDITIVA	13
3.1. Digital Light Processing	14
3.1.1. Funcionament	14
3.1.2. Mecanisme de solidificació	15
4. ESTAT DE L'ART	16
4.1. Propietats del material	16
4.2. Precisió de fabricació	19
4.3. Possibles aplicacions	20
5. DEFINICIÓ DEL MODEL D'ELEMENTS FINITS	22
5.1. Model matemàtic de la conversió	22
5.2. Model matemàtic del mòdul de Young i el coeficient de Poisson	23
5.3. Procediment de creació del model	26
5.4. Element de volum representatiu	28
5.5. Mallat	28
5.6. Condicions de contorn i càlcul de propietats	29
6. ESTUDI DEL SISTEMA DE PROJECCIÓ	30
6.1. Materials i procediments	30
6.2. Efecte dels colors	33
6.3. Estudi de l'enfocament	34
6.4. Estudi de la posició	35
6.5. Obtenció dels perfils	36
6.5.1. Verificació del model	38
7. MESURES AMB MICROSCOPI CONFOCAL	39
7.1. Relació entre rugositat i intensitat lumínica	39

7.2. Obtenció de les relacions d'intensitats	40
8. ASSAJOS EXPERIMENTALS	42
8.1. Anàlisi dels assajos a compressió	42
8.2. Resultats	44
8.3. Anàlisi dels graus de conversió	46
8.4. Ajust	49
9. SIMULACIONS DEL MODEL	50
9.1. Simulacions preliminars i evolució dels models	50
9.2. Simulacions finals	54
9.2.1. Simulació amb model lineal	54
9.2.2. Simulació amb model bilineal	54
9.2.3. Simulació amb el model Ramberg-Osgood	56
CONCLUSIONS	60
AGRAÏMENTS	63
BIBLIOGRAFIA	64
Referències bibliogràfiques	64
10. ANNEXOS	67
10.1. Paràmetres d'ajust gaussià	67
10.2. Tractament de les dades	69

1. Glossari

Símbols

E – Mòdul elàstic o mòdul de Young

ν – Coeficient de Poisson

σ – Tensió

ε – Deformació unitària

δ – Desplaçament absolut

F – Força

R – Força de reacció

A – Àrea

l – Longitud

I – Intensitat lumínica

D – Dosi lumínica

t – Temps d'exposició

σ_0 – Tensió de límit elàstic

χ – Grau de curat

ϕ – Grau de curat normalitzat

k – Ritme de conversió

μ – Coeficient d'atenuació

2. Prefaci

2.1. Motivació

Aquest treball de fi de grau ha estat realitzat com a part d'una col·laboració en la recerca amb el departament de Resistència de Materials de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.

La proposta de la temàtica d'estudi se'm va fer arribar a principis d'any i vaig trobar-la molt interessant, ja que combinava tasques de programació, simulacions d'elements finits, teoria de materials i mecànica dels medis continus i anàlisi de sistemes de fabricació additiva. Abans d'aquest treball els meus coneixements d'aquest camp eren molt superficials però ja em suscitaven interès.

Treballar en aquest projecte ha estat un repte per a mi degut a tots els entrebancs que hem anat trobant durant el camí; tot i això considero que he après moltes coses noves i he tingut la sort de poder sentir que col·laborava en la recerca del departament i en conèixer millor i buscar solucions als problemes que té la fabricació additiva en els processos industrials avui en dia.

2.2. Objectius del projecte

La tecnologia estudiada en aquest treball és la Digital Light Processing (DLP), un cas especial de la fotopolimerització en tanc en què es projecten imatges amb la forma de la capa a solidificar sobre una resina fotosensible. Comparada amb altres tecnologies de fabricació additiva, la fotopolimerització en tanc ofereix resolucions molt altes amb velocitats d'impressió força elevades (especialment el DLP) però amb propietats mecàniques generalment inferiors. En aquest estudi es busca entendre els mecanismes pels quals la resina adquireix les propietats mecàniques finals de la peça per tal de poder buscar un mètode per millorar-les en un futur.

2.3. Abast del projecte

Es parteix d'una extensa recerca teòrica i anàlisi de l'estat de l'art del camp de recerca; aquest exercici permet consolidar les bases teòriques del treball i definir diversos models matemàtics que s'utilitzen al llarg de tot el projecte per descriure comportaments dels materials i processos estudiats.

Amb aquests models definits i l'experiència recollida en estudis i assajos previs es fan les primeres simulacions preliminars; com no s'arriba a cap conclusió es decideix fer un estudi extens sobre el sistema de projecció per buscar possibles factors que no havien estat considerats anteriorment i poden contribuir en l'anisotropia del material.

Per verificar la validesa de la metodologia utilitzada en l'anàlisi del sistema de projecció es realitzen una sèrie de mesures de la rugositat d'unes mostres del material i s'usen els models matemàtics per relacionar les dades de rugositat amb la distribució lumínica dels píxels del projector utilitzat.

Amb l'experiència i les noves dades adquirides en aquests dos estudis es realitzen un seguit de noves simulacions i càlculs teòrics que aclareixen les condicions que podrien explicar el fet que el material sigui anisòtrop. Per comprovar si aquestes condicions es compleixen, es realitzen uns assajos experimentals que permeten descriure el material utilitzat de manera més fidel i no utilitzar models extrets d'altres estudis.

Per posar punt final a aquest treball es presenten els resultats i la metodologia utilitzada per dur a terme les últimes simulacions que utilitzen tot el coneixement adquirit en els altres apartats de l'estudi.

2.4. Antecedents

Amb anterioritat s'han dut a terme estudis en aquesta mateixa universitat sobre les propietats mecàniques de peces fabricades amb la tecnologia del DLP sense tenir en compte els mecanismes que les provoquen [1]; s'ha mirat de caracteritzar l'anisotropia de les peces mitjançant l'ús d'assajos experimentals. En concret s'han imprès diverses peces en cadascuna de les disposicions esquematitzades en la Figura 1 i s'han assajat a compressió al llarg de l'eix y (eix local de cada proveta).

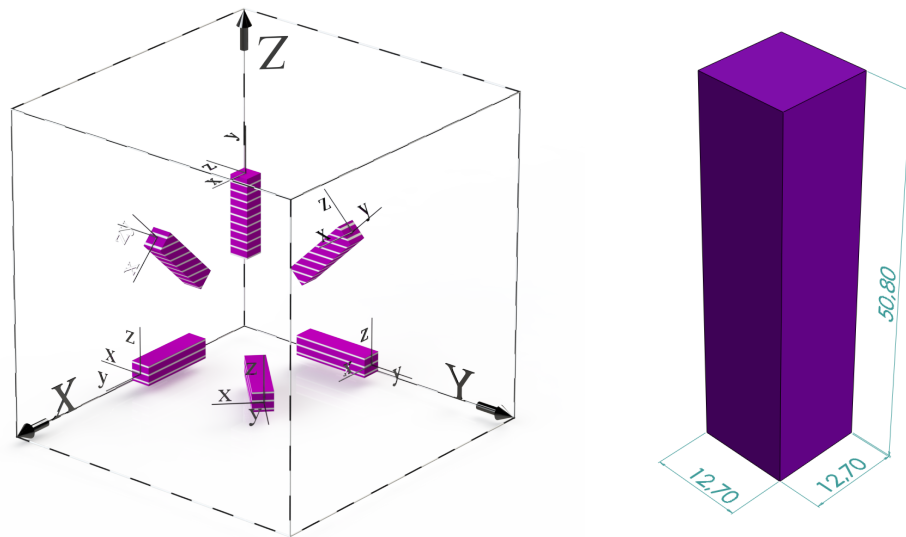


Figura 1. Esquema de les provetes impreses i assajades

Amb els assajos de compressió s'obté el mòdul de Young de cadascuna de les provetes en la direcció assajada i la deformació de les tres direccions principals (eixos locals de cada proveta) sota la situació de compressió amb una càrrega P . En concret s'utilitzen quatre mètodes per obtenir les deformacions. Dos d'aquests mètodes són els utilitzats en aquest estudi: la correlació digital d'imatges (DIC) i les mesures dels desplaçaments de la creueta. Els altres dos són l'extensòmetre i l'ús de galgues extensomètriques. Entre aquestes quatre mesures es conclou que la més vàlida és la que proporciona el DIC; la creueta no mesura la deformació del material directament, les dispersions obtingudes amb l'extensòmetre són majors i les galgues extensomètriques proporcionen mòduls de Young de mitjana més elevada a causa de la rigidesa que aporten a la mesura (vegeu Figura 2).

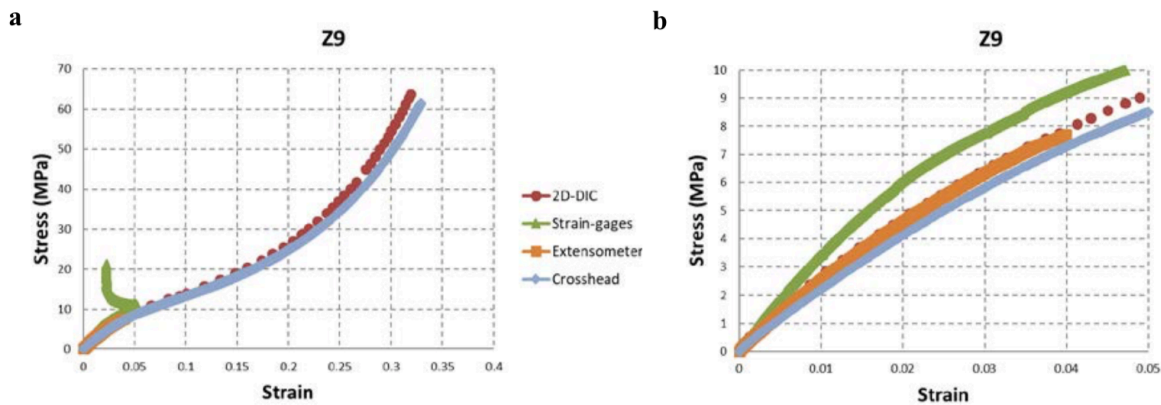


Figura 2 Exemple de les quatre corbes de tensió-deformació extretes amb els quatre mètodes explicats [1]

Utilitzant el mateix procediment que s'ha fet servir en aquest estudi s'obtenen els mòduls de Young de les diferents direccions principals de fabricació a partir de les corbes de tensió-deformació. L'estudi conclou que existeix anisotropia en el pla XY a causa de l'efecte dels píxels del projector utilitzat en la fabricació de les provetes. Les mitjanes i les desviacions estàndard que s'obtenen són les següents:

$$E_x = 206 \text{ [MPa]} \quad E_y = 248 \text{ [MPa]} \quad E_z = 255 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{E_x} = 65 \text{ [MPa]} \quad \sigma_{E_y} = 74 \text{ [MPa]} \quad \sigma_{E_z} = 50 \text{ [MPa]}$$

En estudis futurs, es farà la hipòtesi que el material és ortòtrop (les propietats mecàniques difereixen respecte a les tres direccions ortogonals entre elles). Es farà la mitjana de les deformacions i s'utilitzarà la redundància aportada per les múltiples direccions impreses per trobar els coeficients que descriuen el material com a ortòtrop mitjançant la metodologia exposada en [2].

3. Fabricació additiva

La fabricació additiva, també anomenada impressió 3D, és un procés pel qual es construeixen parts a partir d'un model tridimensional a base de la unió de diverses capes, construïdes una darrere l'altra. Alguns dels avantatges que aquesta tècnica de fabricació avançada aporta són: la llibertat del disseny amb increment de complexitat sense costos, l'eliminació de la mecanització per estalviar temps i costos, la capacitat de fer dissenys més lleugers, la consolidació de parts en reduir el nombre de peces i l'eliminació de passos de producció. Tot i els seus grans avantatges, aquesta tecnologia també té els seus inconvenients que fan que encara no estigui del tot preparada per la seva utilització en l'entorn industrial, alguns dels quals són els alts costos de fabricació tant en temps com en materials, els esforços en dissenyar i optimitzar els paràmetres de fabricació a causa de la complexitat dels processos, la limitació de la mida de les peces fabricades i per últim les baixes propietats mecàniques en alguns casos, l'anisotropia, el pitjor acabat superficial i la inferior precisió dimensional que proporcionen aquestes tecnologies.

La fabricació additiva pot ser classificada en les següents categories (es fa especial èmfasi en les tècniques més utilitzades en la fabricació polimèrica) [3]:

Extrusió de material: basada en l'extrusió de material creant capes bidimensionals que apilades formen la peça tridimensional. Un exemple d'aquest tipus de fabricació additiva és el *Fused Deposition Modelling* on el material extrudit és un filament de polímer termoplàstic fos. Aquesta tecnologia ofereix bones propietats mecàniques amb velocitats lentes, baixa resolució i alt grau d'anisotropia.

Fotopolimerització en tanc: basada en la solidificació d'una resina fotocurable exposant-la a llum ultraviolada (o bé aquella amb la que el fotoiniciador reaccioni). Dos exemples d'aquest tipus de fabricació additiva són el *Stereolithography* on un làser és l'encarregat d'escanejar cadascuna de les capes, i el *Digital Light Processing* on les capes són projectades en comptes d'escanejades. Les peces fabricades amb aquesta tècnica són manufacturades amb altes resolucions i velocitats (especialment amb DLP) però ofereixen propietats mecàniques pitjors que la resta.

Injecció de material: basada en la deposició d'una resina fotosensible que solidifica a causa de la presència d'una llum ultraviolada. Un exemple d'aquest tipus de fabricació additiva és el *Polyjet*.

Fusió en llit de pols: basada en la sinterització o fusió en un llit de pols de material per tal d'anar formant capa a capa la peça. Un exemple d'aquest tipus de fabricació additiva és el *Selective Laser Sintering* on un làser és l'encarregat d'escanejar les capes i sinteritzar el material. Aquesta tecnologia permet l'ús d'altres resolucions i velocitats amb unes bones propietats mecàniques amb l'inconvenient de ser de les més cares.

Gota en pols: basada en la deposició d'un líquid adhesiu sobre un llit de pols per tal d'unir el material capa a capa i formar una peça tridimensional.

Deposició directa d'energia: basada en la deposició i posterior fusió de material capa a capa.

Laminació de xapa: basada en la unió de diverses xapes retallades amb les formes bidimensionals per obtenir la peça tridimensional.

3.1. Digital Light Processing

3.1.1. Funcionament

Aquest estudi es centrarà concretament en l'estudi de les propietats de peces fabricades utilitzant la tecnologia del DLP; en aquest apartat s'analitzarà el funcionament i el potencial d'aquest procés de fabricació additiva.

El funcionament d'aquesta tecnologia es basa en emascarar la llum provinent d'una font lumínica amb un dispositiu capaç de canviar aquestes mascaretes ràpidament de manera digital [4]. Això s'aconsegueix fent ús d'un dispositiu anomenat *Digital Micromirror Device*, inventat per *Texas Instruments*; aquest dispositiu utilitza miralls microscòpics que o bé reflecteixen la llum cap a la superfície de projecció o bé l'envien cap a un dissipador de calor.

En l'aplicació d'aquest dispositiu en la fotopolimerització en tanc, la superfície de projecció és la capa que es vol solidificar. Per tal d'aconseguir-ho la resina es situa dins d'un tanc amb moviment vertical controlat per ordinador que permet que després de la solidificació de cadascuna de les capes, nova resina sense exposar cobreixi la capa acabada de fabricar per poder solidificar la següent (vegeu Figura 3).

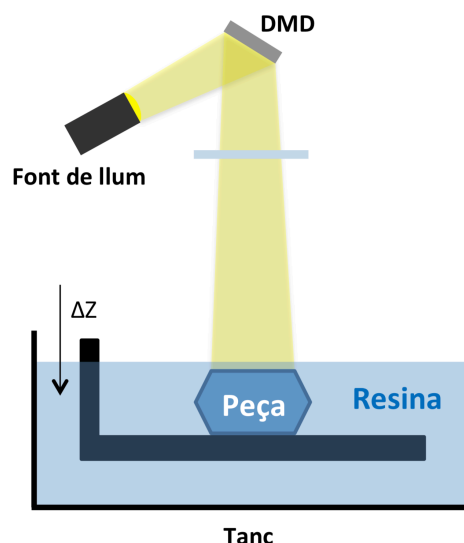


Figura 3 Esquema de la tecnologia DLP

3.1.2. Mecanisme de solidificació

El procés pel qual la resina fotosensible solidifica quan la llum activant incideix sobre ella és un exemple de fotopolimerització; en aquest apartat s'analitzaran els mecanismes que la fan possible i el comportament d'aquest procés en el cas de la fabricació additiva.

Els fotopolimers es poden dividir en cinc grups segons els mecanismes pels quals interaccionen amb la llum [5]: el primer dels grups fa ús d'un fotoiniciador que provoca una polimerització en cadena de monòmers o oligòmers (molècules curtes líquides a temperatura ambient) i resulta en llargues cadenes de polímers reticulats; en el segon grup són els monòmers o oligòmers els que contenen grups funcionals intrínsecament fotoactius; la tercera tipologia fa ús de grups funcionals reactius complementaris que reaccionen per l'excitació lumínica o per la presència d'un fotoiniciador; el quart grup utilitza la diferent solubilitat del radical abans de ser exposat a l'excitació lumínica i la solubilitat del radical resultant, en aquest cas no es creen noves cadenes; l'últim dels grups és compost per polímers les cadenes dels quals es trenquen en ser exposades a la llum, aquest últim grup també utilitza la diferent solubilitat del material exposat i el material sense exposar.

En la fotopolimerització en tanc els materials més utilitzats són els dels primers dos grups; altres exemples d'aplicació de fotopolímers són la fabricació d'adhesius, revestiments, circuits integrats, circuits impresos o aplicacions mèdiques.

Entre els problemes que tenen actualment aquest tipus de materials, el més important avui en dia segueix sent la inhibició de la reacció en presència d'oxigen; això pot ser solucionat augmentant la concentració dels fotoiniciadors o fabricant en una atmosfera sense oxigen.

4. Estat de l'art

En aquest apartat es busca literatura existent dins del camp de recerca d'aquest treball, aquest es pot dividir en tres branques: l'estudi de les propietats del material, l'estudi de la precisió de fabricació i possibles aplicacions de la tecnologia.

4.1. Propietats del material

Al primer dels grups s'hi troben recerques que es centren en el grau de curat del material (percentatge de polímer format enfront de la concentració de monòmers o oligòmers de la resina sense exposar) i en la relació d'aquest amb les propietats mecàniques del material, estudis que busquen relacionar propietats mecàniques amb els paràmetres amb què es fabriquen les peces, articles que estudien tractaments posteriors a la fabricació per tal d'homogeneïtzar i millorar propietats mecàniques i així eliminar anisotropies i estudis que proposen models per explicar els factors que intervenen en la variació de les propietats mecàniques.

En l'anàlisi del grau de curat es troben articles com poden ser [6], on es relaciona el temps d'exposició i el grau de curat així com el grau de curat amb la temperatura de transició vítria; [7], on a base de tests experimentals busquen el temps d'exposició ideal de les capes, s'observa que com més alt és el grau de curat millors són les propietats mecàniques fins a arribar a un punt on excessiva exposició provoca peces fràgils; [8], on es relaciona el temps d'exposició i la intensitat lumínica amb assajos de tracció (vegeu Figura 4) i altres i es proposen models matemàtics per descriure les relacions, i [9], que estudia la relació entre les dosis de radiació UV subministrades a cada capa i el grau de curat de cada punt del material (variacions d'aquest en la direcció perpendicular al pla de la capa) i el gruix de capa. També estudia la relació d'aquest grau de curat amb el mòdul elàstic de cadascun d'aquests punts.

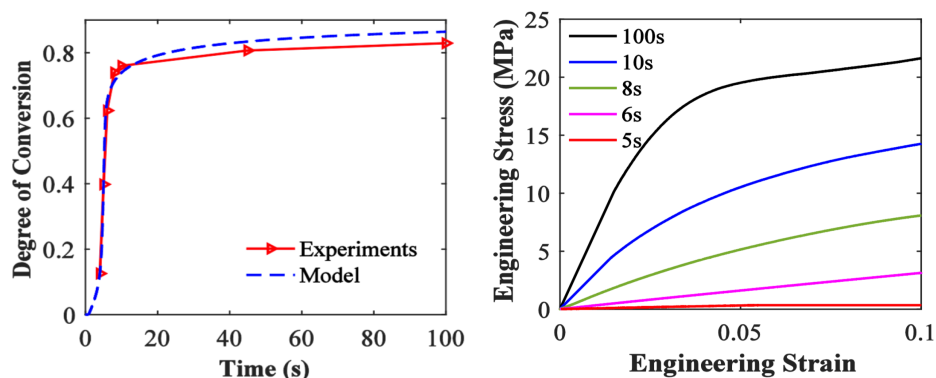


Figura 4 Relació entre el grau de conversió i el temps d'exposició i assajos de tracció amb diferents graus de conversió [8]

Com a exemple dels estudis de relacions d'altres paràmetres de fabricació es veuen [10], on amb tests experimentals conclou que les provetes fabricades en vertical ofereixen millors propietats mecàniques que les impreses en horitzontal si no són tractades amb un procés de curat posterior que en alguns casos elimina bona part d'aquestes anisotropies. Introdueix la hipòtesi que els micromiralls presents en aquesta tipologia d'impressores són una de les principals causes de l'anisotropia, ja que no permeten que tota la capa sigui curada per igual: deixen petites parts amb diferents graus d'exposició. A la Figura 5 es pot observar com els píxels produeixen una rugositat a la superfície de les peces fabricades; [11] i [12], on mitjançant tests experimentals de diverses provetes obtingudes a través d'una impressora DLP es conclou que el gruix de la capa, el temps d'exposició i l'orientació de la peça (diferenciant també entre les dues direccions principals del pla horitzontal) tenen un efecte directe en el mòdul elàstic del material, la tensió i deformació de ruptura, i [13], que comprova l'efecte de l'augment de la temperatura de la resina en el procés d'impressió i conclou millores en temps d'impressió i propietats mecàniques en aconseguir reduir l'energia crítica i per tant el temps d'exposició i la sobrepolimerització, però també observa un augment d'anisotropia.

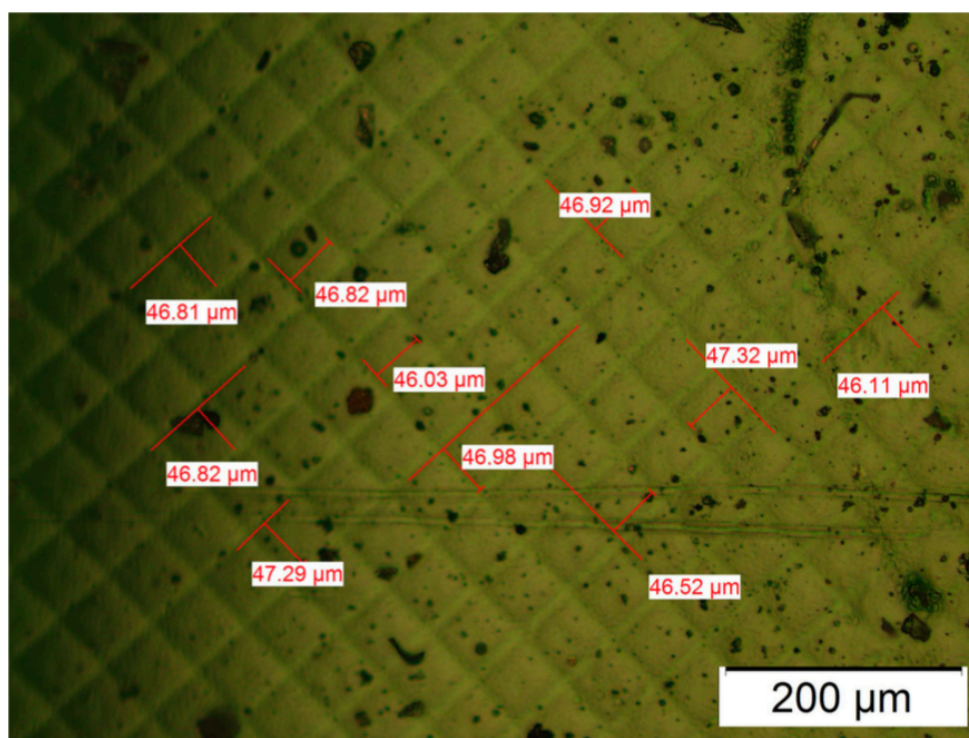


Figura 5 Visualització dels píxels en la superfície de la peça fabricada amb DLP que produeixen anisotropies en el material [10]

Pel que fa als estudis que proposen tractaments de postcurat s'hi troba el [6], on s'observen les anisotropies que es produeixen amb la fotopolimerització (vegeu Figura 6) i es proposa un tractament de les peces basat en feix d'electrons per tal d'homogeneïtzar i millorar les propietats mecàniques, i [14], que presenta una resina fotocurable que, amb posterior tractament a alta temperatura obté propietats mecàniques comparables a les de resines epoxy industrials.

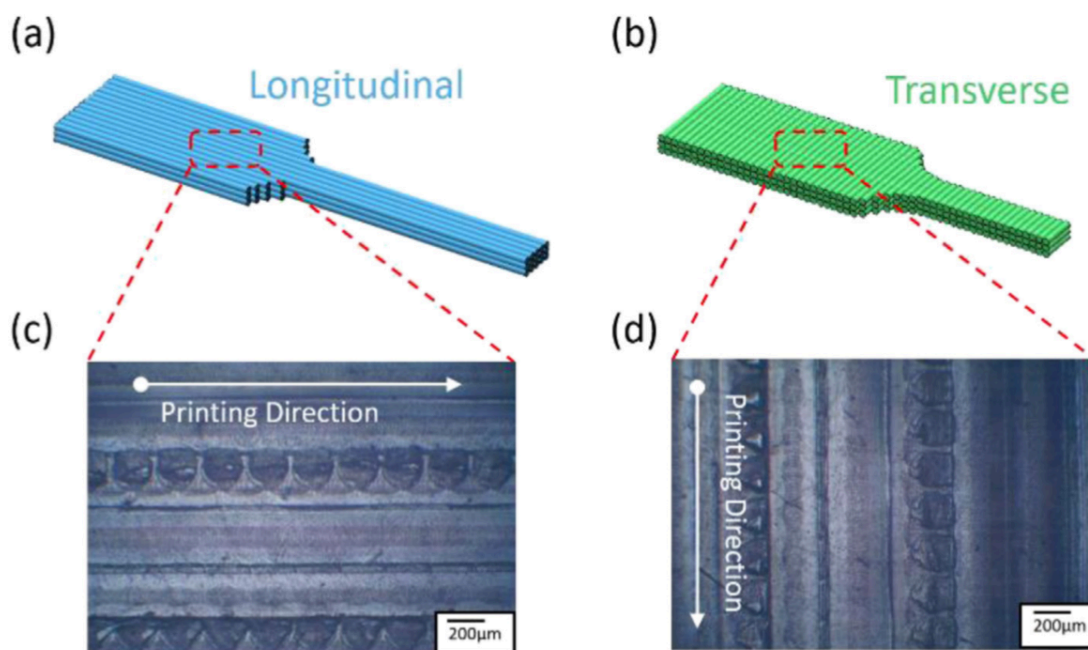


Figura 6 Models i imatges microscòpiques de provetes impreses en dues direccions amb la tecnologia SLA [6]

Per tancar el grup centrat en les propietats mecàniques, s'hi troben estudis que cerquen un model per tal d'explicar les diferents propietats mecàniques al llarg dels punts del material, aquest és el cas de [15], que en concret busca utilitzar l'encongiment del material i propietats mecàniques com el mòdul elàstic per la fabricació de peces que es pleguen i despleguen sota diferents condicions (vegeu Figura 7).

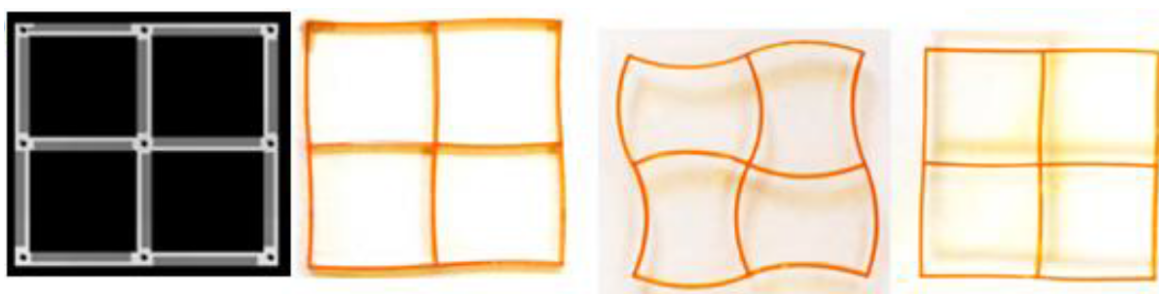


Figura 7 Escala de grisos i resultats de la fabricació d'una peça que es deforma sota certes condicions i retorna a l'estat inicial [15]

4.2. Precisió de fabricació

Pel que fa a la segona de les branques, la que es centra en les resolucions que aquesta tecnologia pot proporcionar, s'hi troben estudis com [16], la descripció d'un model analític per optimitzar l'homogeneïtat del grau de curat i la resolució en la direcció Z (vegeu Figura 8). L'estudi es focalitza en els problemes que esdevenen a causa dels diferents graus de penetració de l'energia lumínica en el material. Argumenta que si no es té en compte, els graus d'exposició del material varien també verticalment entre capa i capa; [17], on es presenta un mètode per aconseguir millorar la resolució de les impressores DLP mitjançant el control de la intensitat amb la qual s'encén cadascun dels píxels (escala de grisos). Observa que els píxels d'aquest tipus d'impressores presenten ombres produïdes entre píxels veïns, la llum dins de cada píxel es distribueix seguint una distribució gaussiana (es presenta un mètode per captar aquesta distribució, vegeu Figura 9), la llum en cada punt del material és en realitat la suma de la contribució de les aportacions de tots els píxels veïns i la quantitat de llum desitjada pot ser aconseguida manipulant l'escala de grisos de cada píxel per tal d'aconseguir una capa curada amb la forma desitjada; [18], que busca solucionar els problemes d'aquest tipus d'impressió relacionats amb toleràncies i acabats superficials enfocant la recerca cap a la formulació del fotopolímer. Jugant amb les composicions aconsegueix variar comportaments com la penetració de la llum. Observa que en el cas de la seva impressora la distribució de llum dins dels píxels és cònica i presenta una notable inclinació, si no es té cura de reduir la propagació de la llum dins del material solidificat les toleràncies dimensionals i superficials se'n veuen afectades. Controlant la composició de la resina afirmen poder aconseguir detalls de mida inferior als píxels amb altes toleràncies, i [19], on s'estudia un mètode per predir l'alçada de material solidificat a partir d'una imatge projectada amb una impressora DLP; a partir de l'estudi de la intensitat lumínica d'un píxel i la mínima intensitat per la qual el material solidifica es construeix un model 3D de la predicció molt semblant a la realitat.

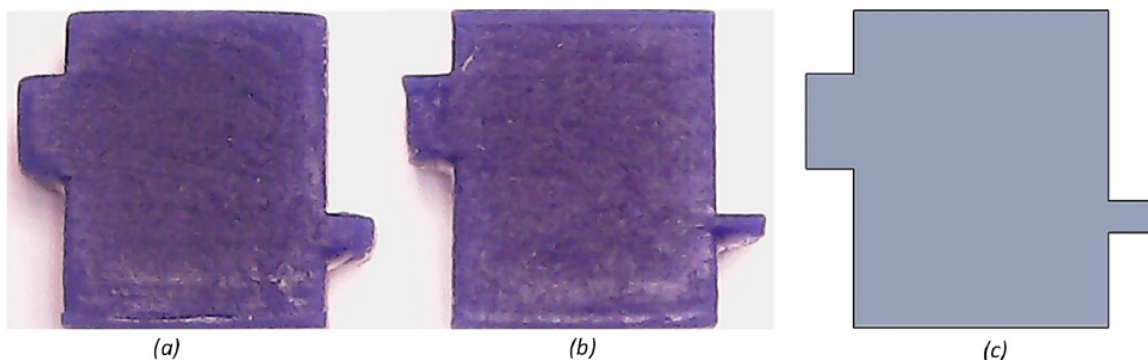


Figura 8 Millora de la resolució en z obtinguda a partir del model d'optimització [16]

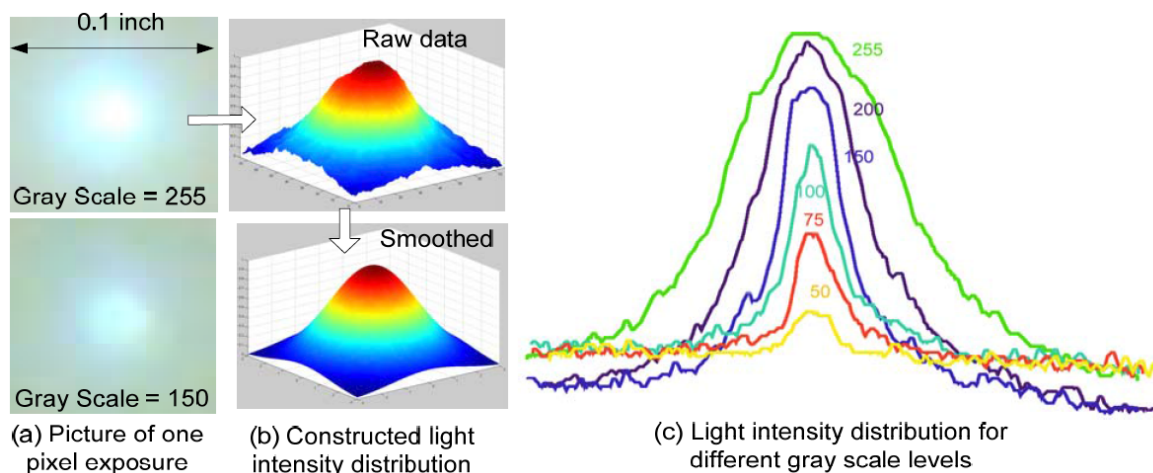


Figura 9 Intensitat lumínica de diferents valors d'escala de grisos extretra a partir de la projecció d'un píxel sobre la resina fotosensible [17]

4.3. Possibles aplicacions

Per acabar, a l'últim dels grups hi trobem diverses possibles aplicacions d'aquesta tecnologia, alguns exemples són [20], que presenta la creació d'un sensor de força imprès en 3D (vegeu Figura 10); [21], estudi d'un material fotocurable que permet llargues elongacions (vegeu Figura 11) adequat per ser utilitzat en, entre d'altres, impressores que utilitzen la tecnologia DLP; [22], on s'utilitza la precisió dimensional que ofereixen les impressores DLP en aplicacions mèdiques, i [23], on s'utilitza aquesta mateixa precisió per fabricar membranes amb freqüències ressonants específiques per demostrar el seu possible ús com a dispositiu electroacústic.

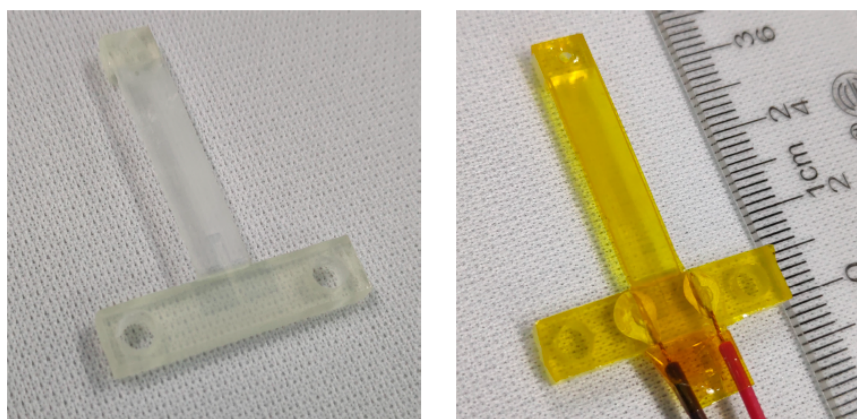


Figura 10 Sensor de força fabricat amb la tecnologia DLP [20]

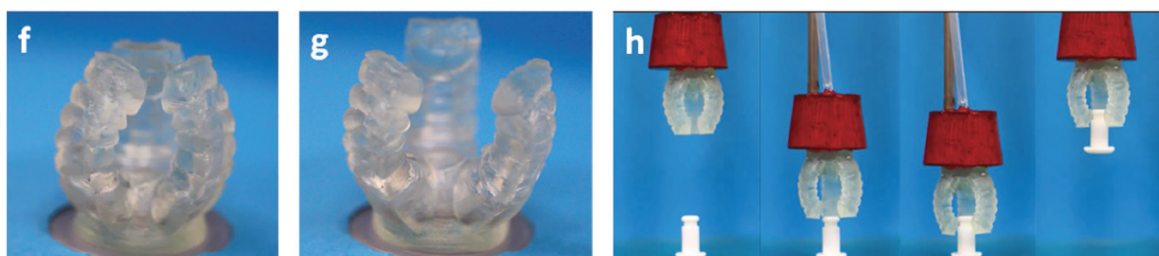


Figura 11 Exemple d'aplicació de fabricació amb elastòmers a “soft robotics” utilitzant la tecnologia DLP [21]

5. Definició del model d'elements finits

En aquest apartat es presenten els models matemàtics utilitzats en aquest estudi per relacionar les intensitats lumíniques amb els graus de conversió i les conseqüents propietats puntuals del material per després obtenir i analitzar el model d'elements finits que en resulti. Posteriorment es mostra el procediment general utilitzat per preparar i realitzar totes les simulacions.

5.1. Model matemàtic de la conversió

El grau de conversió pot ser definit com el percentatge de polímer format enfront de la concentració de monòmers o oligòmers de la resina sense exposar. Si tots els monòmers o oligòmers han passat a formar part de cadenes polimèriques el material tindrà un grau de conversió del 100%. Per tal de ser més entenedor el grau de conversió es normalitza dividint-lo pel màxim grau de conversió que s'obtingria si el temps d'exposició fos infinit.

És imprescindible conèixer com es comporta la resina davant la irradiació lumínica; és per això que es busca un model matemàtic per predir la conversió (normalitzada) depenent del temps d'exposició (t), la intensitat lumínica (I) i la distància del pla de projecció (z). El model proposat per [9] és el següent:

$$\phi(z, t) = 1 - e^{-K \cdot I \cdot t \cdot e^{-\mu \cdot z}} \quad (1)$$

Amb K el ritme de conversió del material i μ el coeficient d'atenuació.

És important remarcar que les capes reben exposició lumínica de les capes posteriors i per tant la dosi en un punt és l'acumulació de les dosis rebudes a causa de les diferents capes impreses. Per tant el model es pot expressar com:

$$\phi(D) = 1 - e^{-K \cdot D} \quad (2)$$

$$D = \sum D_0 \cdot e^{-\mu \cdot z_i} \quad (3)$$

Amb D_0 la dosi rebuda pel pla de projecció i z_i la distància entre el punt estudiat i el pla de projecció de la capa i . La conversió entre lluminositat i D_0 així com el coeficient d'atenuació i el ritme de conversió han estat determinats en estudis anteriors amb proves experimentals [16].

5.2. Model matemàtic del mòdul de Young i el coeficient de Poisson

La relació entre el grau de conversió i el mòdul de Young pot ser aproximada per una funció exponencial [15]:

$$E(\phi) = E_c \cdot e^{b \cdot \phi} + E_d \quad (4)$$

Amb E_c , E_d i b paràmetres d'ajust, ϕ el grau de conversió normalitzat i $E(\phi)$ el mòdul de Young.

És fàcil veure (vegeu Figura 12) que el mòdul de Young augmenta ràpidament a l'últim tram de la corba, un petit canvi del grau de conversió pot provocar canvis molt grans de mòdul elàstic.

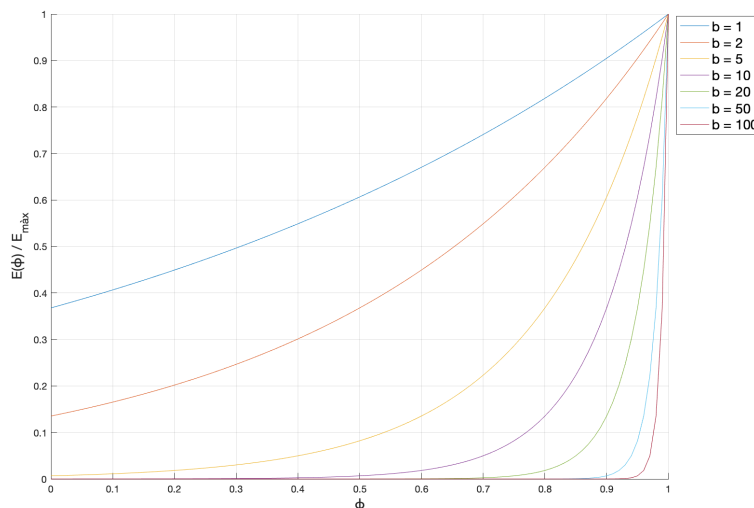


Figura 12 Relació entre els mòdul de Young i el grau de conversió per diferents valors de b ($E_d = 0$)

Per verificar la validesa del model s'extreuen dades del mòdul elàstic d'un altre estudi i s'hi ajusta l'equació $E(\phi)$. S'observa que amb un sol tram de corba el model no aconsegueix descriure el comportament del material; però si s'ajusta l'últim tram de la corba (que és el tram més interessant, ja que els graus de conversió de les peces fabricades es mouen en aquest rang), el model es comporta de manera molt semblant (vegeu Figura 13).

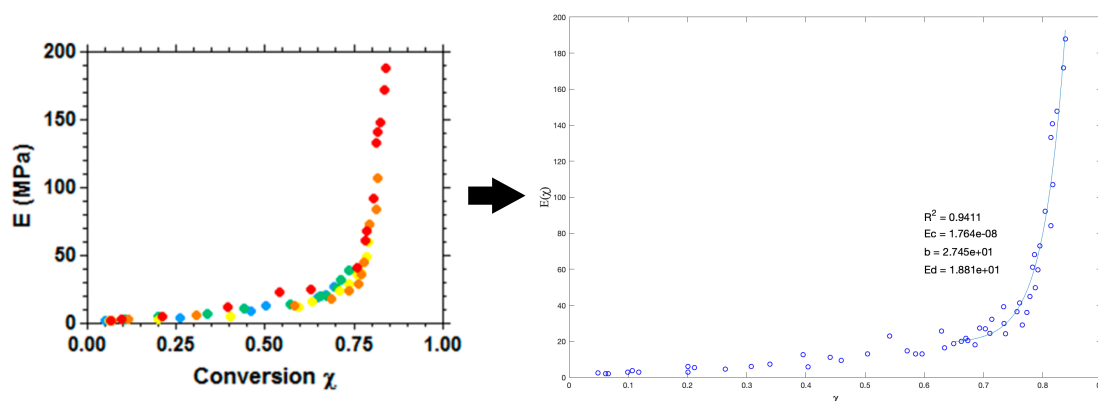


Figura 13 Ajust de les dades experimentals de [9] que relacionen el mòdul de Young amb el grau de conversió (sense normalitzar)

Pel que fa al comportament del material en aquest estudi es consideren tres possibilitats (vegeu Figura 14): un material completament lineal (el més allunyat de la realitat), un material bilineal (plastifica a partir del límit elàstic) o un material que segueix la relació Ramberg-Osgood (entra a la plastificació suaument i no bruscament com en el cas anterior).

L'equació que modelitza aquest últim comportament és la següent:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + k \cdot \left(\frac{\sigma}{E}\right)^n \quad (5)$$

On k i n són paràmetres d'ajust perquè la corba representi el comportament del material, ε és la deformació, σ la tensió i E el mòdul elàstic.

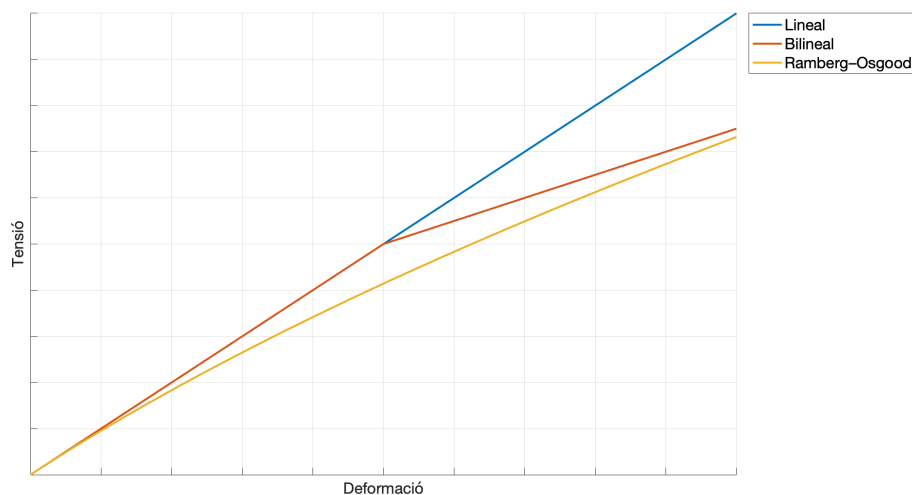


Figura 14 Els tres comportaments de material considerats

El coeficient de Poisson s'ha pres com a constant com es fa en altres estudis [15].

Per ajustar el comportament de la resina utilitzada als models definits en aquest apartat, aquest estudi es basa en les corbes de tensió-deformació que es van extreure dels assajos experimentals en estudis previs, relacions entre graus de conversió i mòdul elàstic trobades en altres investigacions i les relacions trobades en l'apartat d'assajos d'aquest treball.

Model elàstic

Aquest és el model més senzill de tots i el que més lluny està d'explicar el comportament del material; en aquest cas com el material es comporta elàsticament per qualsevol deformació els únics dos paràmetres que cal definir són el mòdul de Young i el coeficient de Poisson per cadascun dels graus de conversió; el primer paràmetre es fa variar amb una de les corbes que relacionen el mòdul elàstic amb el grau de conversió i el segon paràmetre es considera constant, tal com s'ha indicat anteriorment.

Model bilineal

Aquest model és una mica més complex i necessita quatre paràmetres: els dos explicats pel cas del model elàstic i dos més que permeten descriure la plastificació; en concret cal afegir el límit elàstic de cada material, definit com la tensió per la qual el material passa a deformar-se plàsticament i el mòdul elàstic que presenta el material en aquesta nova situació. Aquests dos paràmetres s'ajusten amb les corbes de tensió-deformació dels assajos experimentals i es fan variar linealment amb el mòdul de Young de cada material. Per exemple, si s'observa que per un mòdul elàstic E_1 , el límit elàstic és σ_0^1 i la deformació de límit elàstic és ε_0^1 ; els paràmetres per un material amb mòdul elàstic E_2 seran:

$$\sigma_0^2 = \sigma_0^1 \cdot \frac{E_2}{E_1}; \quad \varepsilon_0^2 = \varepsilon_0^1 \cdot \frac{E_2}{E_1}; \quad (6)$$

Model Ramberg-Osgood

Aquest és el model més complex, ja que a part de definir el comportament elàstic i plàstic del material també defineix la transició entre aquests dos comportaments. Una vegada més s'ajusten aquests paràmetres amb les corbes de tensió-deformació dels assajos de compressió. En concret s'utilitza la forma de l'equació:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \cdot \frac{\sigma}{E} \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{n-1} \quad (7)$$

Els tres paràmetres a ajustar en aquesta equació són el límit elàstic (σ_0) i els coeficients α i n que descriuen tant el comportament plàstic del material com la transició entre la deformació elàstica i la plàstica. Aquesta segona manera d'expressar la relació de Ramberg-Osgood és més interessant que la primera ja que apareix el paràmetre σ_0 , límit elàstic, que es podrà fer variar de la mateixa manera que s'ha descrit pel cas del model bilineal.

5.3. Procediment de creació del model

A partir de les corbes de lluminositat i els models descrits als apartats anteriors es dissenya un seguit de programes que sobreposen les corbes per tenir en compte l'efecte dels píxels veïns i seguidament calculen les dosis acumulades de diverses capes, tantes com sigui necessari perquè les dosis s'estabilitzin. El procediment seguit és el següent:

1. Sobreposat dels píxels per tal d'obtenir les dosis rebudes per la resina a la superfície de projecció ($z = 0$), vegeu la Figura 15 com a exemple. Aquest primer pas no és necessari per al cas de les intensitats relatives trobades a partir de la rugositat de la fabricació d'una capa.

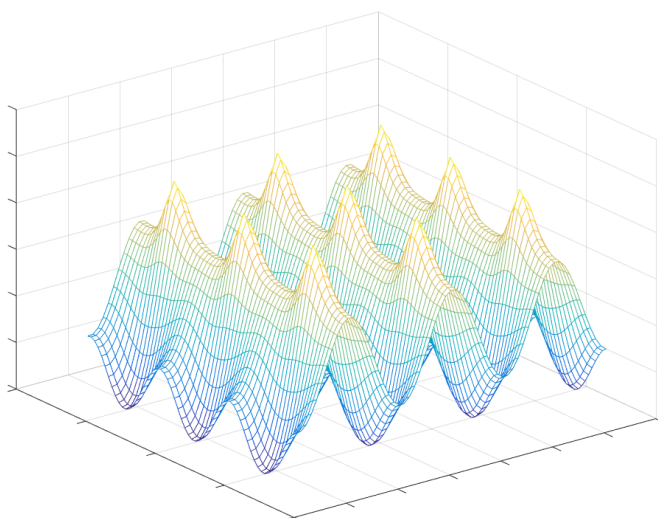


Figura 15 Exemple de la superposició de les intensitats de varis píxels

2. Aplicant el model matemàtic de la conversió es busquen els canvis en z quan les conversions s'estabilitzen (com més capes es tenen en compte més puja el valor de la conversió fins que arriba a l'equilibri, vegeu Figura 16).

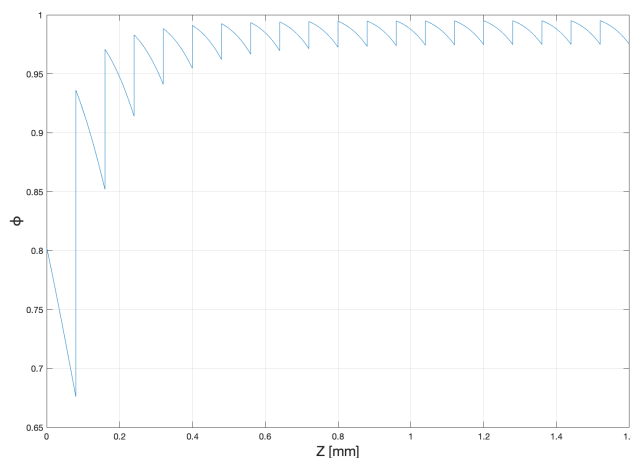


Figura 16 Exemple de com les dosis s'acumulen i s'estabilitzen amb l'efecte de les capes i com això afecta al grau de conversió

3. S'aïlla un dels píxels i es repeteix tantes vegades com requereixi el model; s'obtenen així els nodes del model.
4. Es defineix un element per cada 8 nodes consecutius i s'hi assigna un valor de grau de conversió igual a la mitjana dels graus de conversió dels seus 8 nodes.
5. Amb el model matemàtic de les propietats del material s'obtenen les propietats puntuals de cada element definit (vegeu Figura 17).

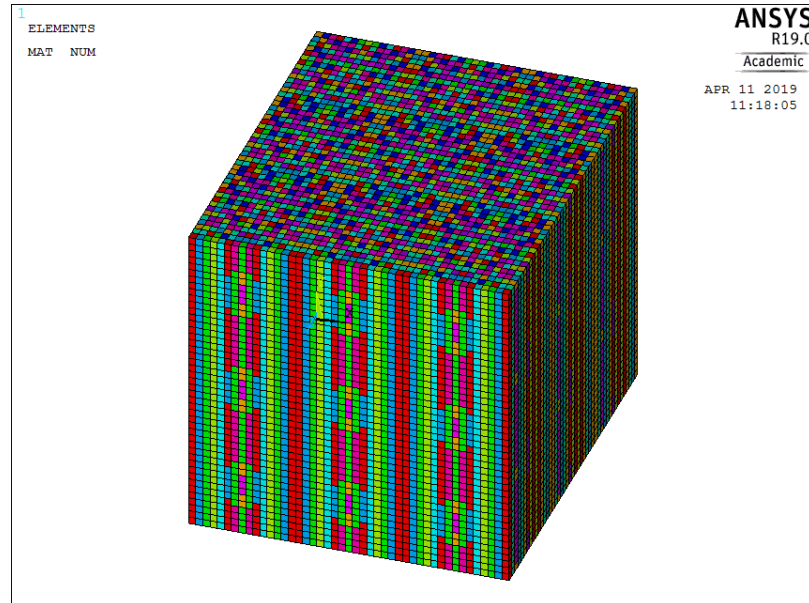


Figura 17 Model de 3 · 3 píxels i 3 capes amb les propietats de tots els elements definides

5.4. Element de volum representatiu

Per les periodicitats que presenta el material a causa del sistema de projecció (periodicitat en els tres eixos principals de fabricació) el model d'elements finits que s'estudiarà serà un element de volum representatiu (RVE), usualment utilitzat per estudiar materials compostos. Es tracta d'analitzar com es comporta una cel·la del material per tal d'extreure'n les propietats que hauran de ser les mateixes que les del material (a causa de la periodicitat abans esmentada, vegeu Figura 18).

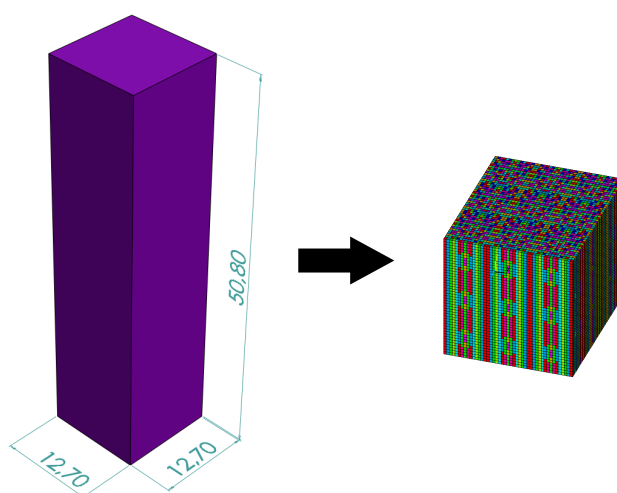


Figura 18 En comptes de simular tots els píxels que s'han utilitzat per fabricar les provetes es simula només un cub de $3 \cdot 3$ píxels i 3 capes

5.5. Mallat

El model és mallat amb elements SOLID185 rectangulars amb un node a cada punt de la matriu de graus de conversió de partida (tal com s'ha explicat a l'apartat de procediments). És important notar que la mida dels elements és molt important en aquest model: les propietats puntuals del material s'assignen als elements i no als nodes pel que és necessari fer una mitjana de les propietats d'aquests; això provoca un efecte de filtratge que esdevé més petit com més petita és la malla.

5.6. Condicions de contorn i càlcul de propietats

Les primeres simulacions consisteixen en compressions de volums representatius amb un nombre de $2 \cdot 2$ píxels i 2 capes o de $3 \cdot 3$ píxels i 3 capes. Per tal d'obtenir els paràmetres que defineixen el comportament ortotròpic s'apliquen compressions al llarg dels tres eixos principals i s'impedeixen els moviments de sòlid rígida (vegeu Figura 19). A partir de les reaccions dels nodes on s'apliquen els desplaçaments s'obtenen els mòduls elàstics; a partir de les deformacions de les direccions no comprimides s'obtenen els coeficients de Poisson. Per exemple, d'una simulació amb compressió al llarg de l'eix X s'obindrà:

$$E_x = \frac{R_x}{S} \cdot \frac{1}{\varepsilon_x}; \quad \nu_{xy} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}; \quad \nu_{xz} = \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \quad (8)$$

Amb E_x el mòdul de Young en la direcció X, ν_{xy} i ν_{xz} els coeficients de Poissons XY i XZ respectivament, R_x el sumatori de totes les reaccions d'una de les cares en les que s'imposa la compressió, S la secció de la peça perpendicular a la direcció X i ε_i les deformacions unitàries al llarg de la direcció i.

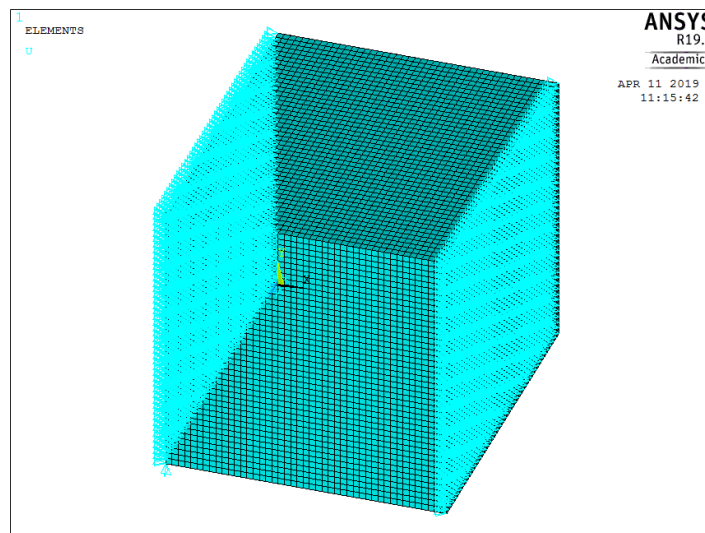


Figura 19 Condicions de contorn aplicades per simular una compressió al llarg de l'eix X

Més endavant es fa evident que aquest mètode té les seves limitacions: s'observa que els píxels del mig no es comporten de la mateixa manera que els dels laterals. És per això que es pren la decisió de simular $3 \cdot 3$ píxels i 3 capes i estudiar les reaccions del píxel del mig de la cara on s'imposen les condicions de contorn de desplaçament.

Per tal de simular els assajos amb models plàstics també s'utilitzen simulacions a passos per obtenir les tensions del píxel central per diferents estats de deformació; amb aquest mètode no només s'obté un mòdul de Young per cadascuna de les direccions principals, també s'obté una corba de tensió-deformació que s'utilitza per comparar els resultats de les simulacions amb els assajos de compressió.

6. Estudi del sistema de projecció

Un primer pas per entendre com el material adquireix les seves propietats mecàniques finals és analitzar el dispositiu utilitzat per projectar les màscares sobre la resina per tal de solidificar cada capa. Es busca modelitzar la intensitat lumínica que rep cada punt de la superfície il·luminada, en concret trobar un model matemàtic de la distribució de l'energia d'un píxel per posteriorment relacionar la dosi energètica de la superposició d'uns quants píxels amb el grau de conversió i propietats mecàniques.

6.1. Materials i procediments

En aquest estudi en concret s'utilitza un projector ACER H6510BD amb una resolució de 1920 x 1080 píxels que es troba a una distància de 150 mm del tanc que conté la resina fotocurable, una plataforma és l'encarregada de moure les capes ja exposades per tal que nova resina pugui ser convertida.

Per tal de captar l'energia del píxel s'utilitza una càmera IDS UI-3000SE-M-GL equipada amb una òptica COSMICAR 50 mm F/1,8 i un extensor de 40 mm, la càmera compta amb un sensor CMOS lineal monocrom de 12 bits equipat amb 4104 x 3006 píxels.

El procediment seguit per captar els perfils d'energia consisteix en situar el projector a 150 mm de la superfície on es vol projectar i posicionar la càmera a la mateixa alçada però amb un angle per tal de no obstaculitzar el feix de llum (vegeu Figura 20); la deformació causada per aquest angle es té en compte posteriorment a l'hora de fer els càlculs. Per tal de captar informació sobre la mida del píxel i la deformació causada per la posició de la càmera es prenen dues imatges consecutives: una amb 4 píxels encesos (proporciona informació sobre la distància entre aquests i per tant de la mida del píxel) i una amb un de sol (d'on s'extraurà el perfil).

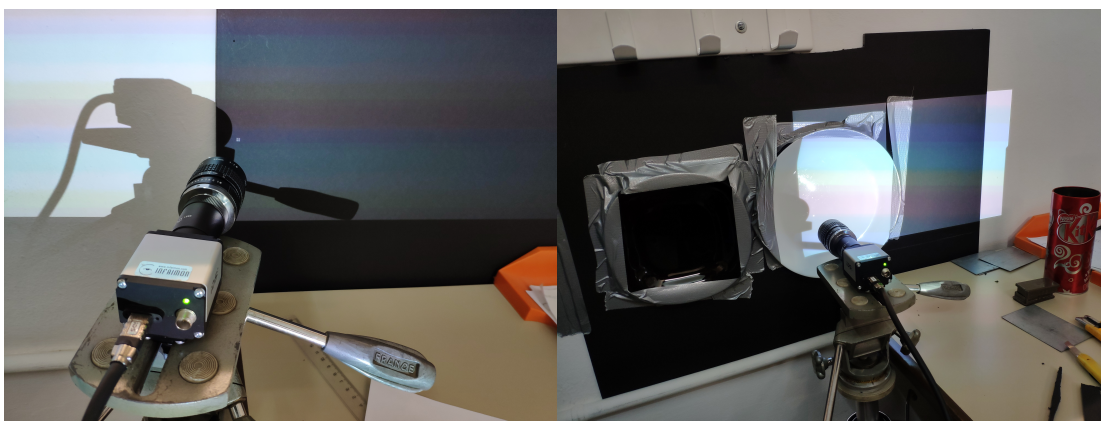


Figura 20 Muntatge de projecció i adquisició d'imatges

Pel que fa a la superfície de projecció, es comença a treballar amb una cartolina negra, ja que en un primer moment es creu que com més fosca sigui la superfície de projecció menys problemes portarà captar el píxel, ja que el sensor de la càmera no es saturarà. Com es pot veure a la Figura 21 aquesta superfície presenta una alta rugositat pel que es decideixen provar superfícies més llises.

Les següents superfícies que es proven són la d'una ceràmica fosca, un tros de plàstic negre i una ceràmica completament negra. Pel cas del plàstic és fàcil veure que la rugositat segueix sent massa elevada; les superfícies ceràmiques presenten una bona rugositat però, contràriament al que es creia, en absorbir bona part de la llum es fa difícil captar el píxel amb tota la resolució que la càmera permet. És per això que es decideix provar una ceràmica blanca que dona més bons resultats però s'hi observen problemes de reflexions, cosa que fa que el nivell base (nivell de lluminositat on no hi ha cap píxel encès) sigui força elevat.

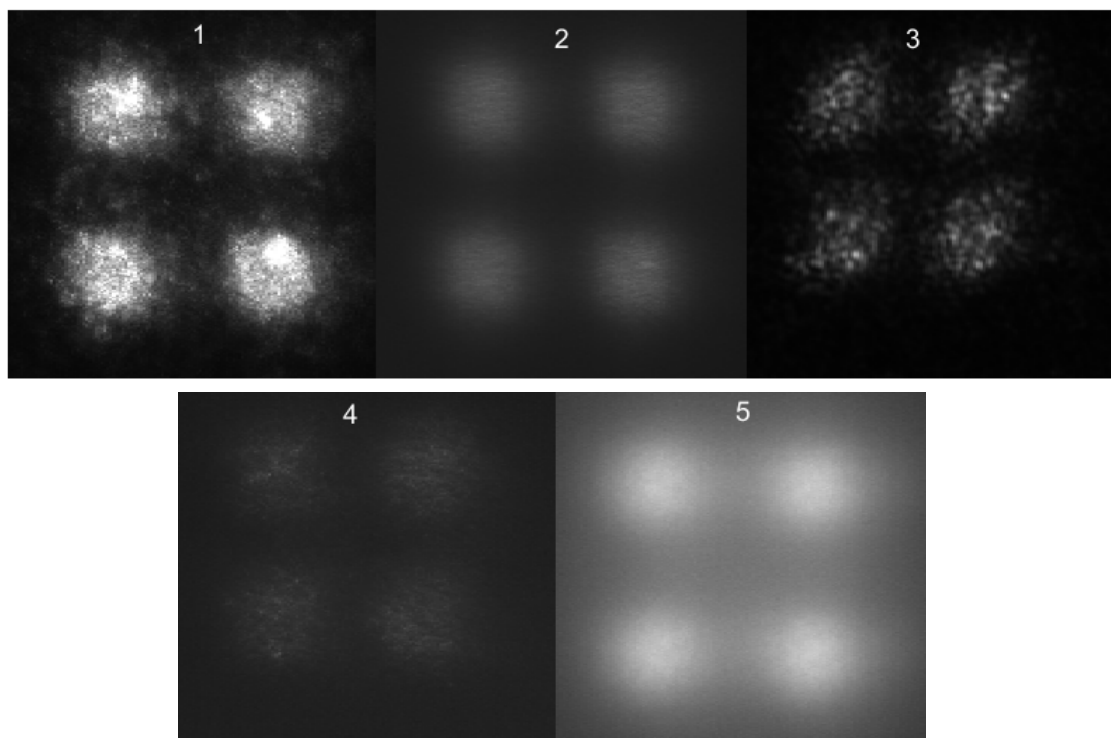


Figura 21 Proves de diferents superfícies de projecció. (1) Cartolina negra. (2) Ceràmica fosca. (3) Plàstic negre. (4) Ceràmica negra. (5) Ceràmica blanca.

En vista dels resultats, es busquen materials preferiblement blancs, amb una superfície el més llisa i uniforme possible però que no generi reflexions; es proven diferents papers i cartolines (un paper blanc i dues cartolines blanques, una d'elles setinada). Ara el diafragma de la càmera cal tancar-lo molt per tal que el sensor no es saturi; aquest fet també ajudarà a fer que la rugositat de la superfície de projecció sigui més inapreciable.

S'observa una millora considerable dels resultats (vegeu Figura 22): la textura de la superfície no és apreciable i les diferències entre la lluminositat dels píxels i la base són molt grans. Es comparen el paper i les cartolines blanques i no s'observen grans diferències; per tant es decideix optar per la superfície amb menys rugositats, la de la cartolina setinada.

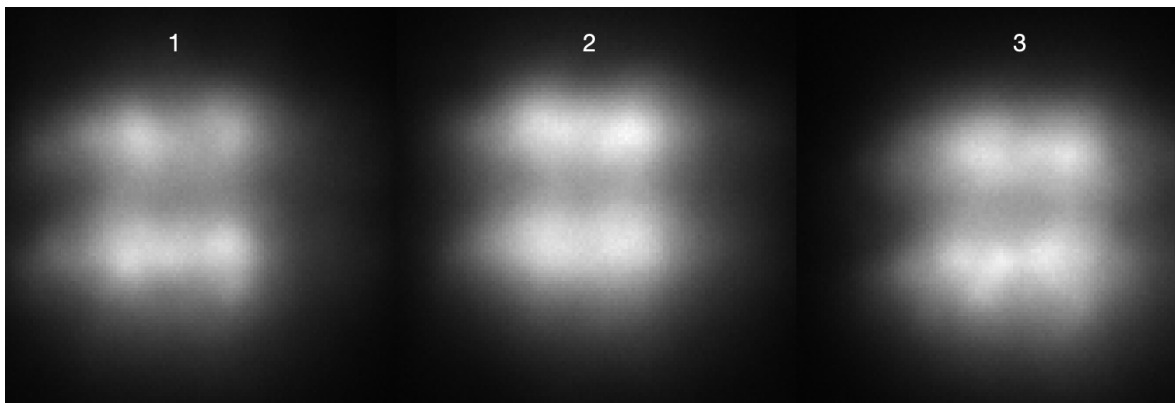


Figura 22 Comparativa de diferents superfícies. (1) Paper blanc. (2) Cartolina setinada. (3) Cartolina mat.

6.2. Efecte dels colors

Totes les resines fotocurables tenen una absorció característica que depèn de la longitud d'ona de la llum incident; la resina utilitzada en aquest estudi absorbeix la majoria de la llum blava però gairebé no reacciona amb la verda i la vermella; és per això que es decideix fer un estudi de com es comparen els píxels d'aquests tres colors. Per fer això s'obtenen tres fotografies seqüencials en les quals només s'encén un dels tres colors. La superposició de les tres imatges s'observa en la Figura 23.



Figura 23 Superposició de tres imatges consecutives per observar les diferències d'enfocament entre colors

S'observa que en aquest cas els píxels blau i vermell són allargats verticalment però els píxels verds són allargats horitzontalment. En vista d'aquests resultats es decideix fer un estudi de com afecta l'enfocament del projector i la posició del píxel dins de la superfície projectada a les diferents formes dels píxels distingint entre colors. Aquest efecte pot provocar que enfocar el projector sigui molt més difícil, ja que l'enfocament ideal no és el mateix per tots els colors.

6.3. Estudi de l'enfocament

Mentre es feien les proves de les diferents superfícies es percep una gran dificultat a l'hora d'enfocar el projector: l'únic mètode previst és el d'una rodeta amb un recorregut no gaire gran que fa que l'enfocament sigui difícil de metoditzar. És per això que es fan unes marques a aquesta rodeta i es defineixen unes gradacions per tal d'observar qualitativament l'efecte d'un petit moviment. Un canvi d'una gradació d'aquesta rodeta equival a un gir de 1/110 del total del seu recorregut. Es percep que un petit gir de la rodeta provoca canvis significatius en l'enfocament i distorsió dels píxels (vegeu Figura 24); també es veu més clarament com aquesta distorsió és diferent en cadascun dels colors per cada posició.

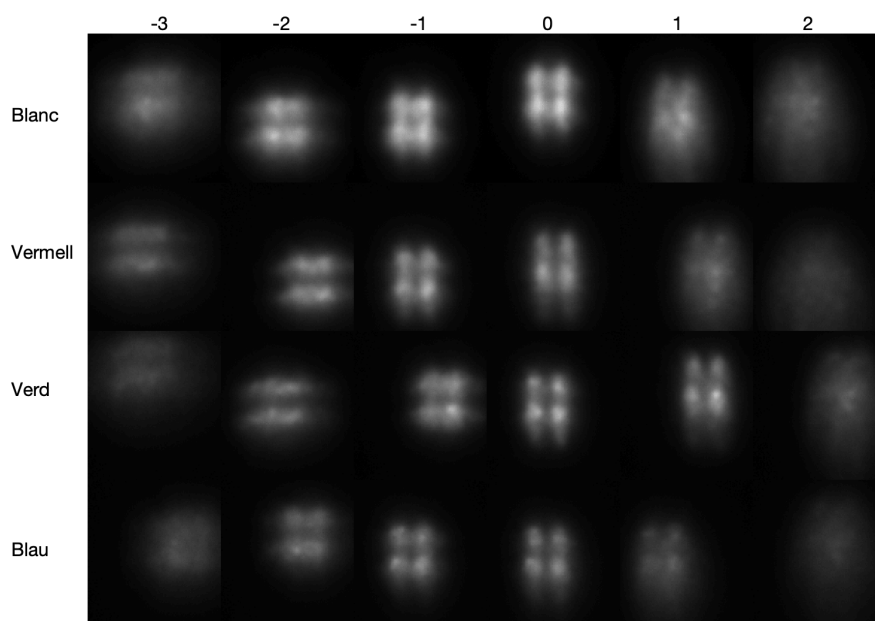


Figura 24 Efecte de l'enfocament en els diferents colors

S'observa que arribar a l'enfocament ideal és molt difícil; aquesta podria ser una de les causes de les anisotropies dels materials: podria ser que en la posició on sembla que l'enfocament és millor els píxels blaus presentin deformacions que afavoreixen zones amb intensitats lumíniques superiors en una de les direccions de projecció.

6.4. Estudi de la posició

Mentre s'enfoca el projector s'aprecia la impossibilitat d'aconseguir una imatge uniformement enfocada; es decideix mesurar com de distorsionats són els píxels més allunyats del centre amb el sistema de gradació explicat en l'apartat anterior.

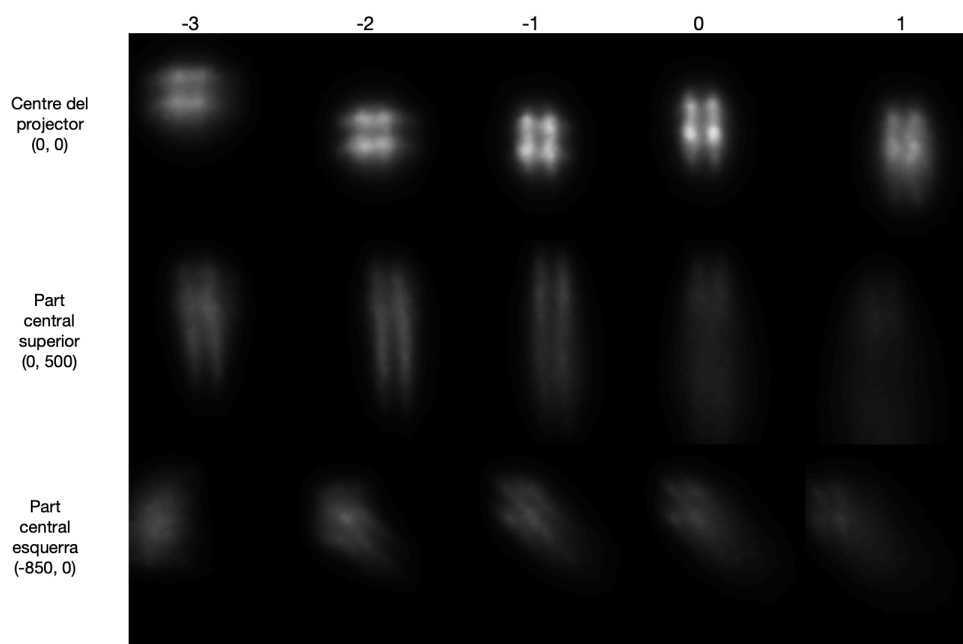


Figura 25 Efecte de la posició en l'enfocament

En la Figura 25 es pot observar com els píxels dels costats queden desenfocats quan el centre està enfocat. Per això és important que totes les peces siguin impreses com més centrades millor. Una vegada més s'observa la dificultat d'arribar a l'enfocament ideal: quan una zona de la superfície de projecció està enfocada una altra es desenfoca. També s'observa que hi ha més distorsió en la direcció vertical que en l'horitzontal. Aquesta podria ser una altra causa important d'anisotropia: les distribucions lumíniques dels píxels variaran de manera diferent en les dues direccions de fabricació i per tant també ho farà el grau de conversió i les propietats del material.

6.5. Obtenció dels perfils

En aquest apartat es busca un model matemàtic per ajustar la forma de la intensitat lumínica dels píxels. Es busquen els paràmetres d'ajust per cadascuna de les posicions d'enfocament estudiades a l'apartat anterior pel cas dels píxels blancs (els píxels amb els tres colors encesos) i el cas dels píxels blaus (la longitud d'ona que més absorbeix la resina utilitzada en aquest estudi).

La primera aproximació que s'intenta per obtenir el perfil dels píxels és modelitzar-los amb una funció gaussiana com la de l'equació:

$$f_1(x, y) = A \cdot e^{-\left[\left(\frac{(x-x_0)^2}{2\cdot\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\cdot\sigma_y^2}\right)^p\right]} + f_0 \quad (9)$$

Amb A l'amplitud de la gaussiana, x_0 i y_0 les coordenades del seu centre, σ_x i σ_y mesures de les dispersions en les dues direccions, p un coeficient per ajustar la forma de la campana i f_0 el nivell base de lluminositat.

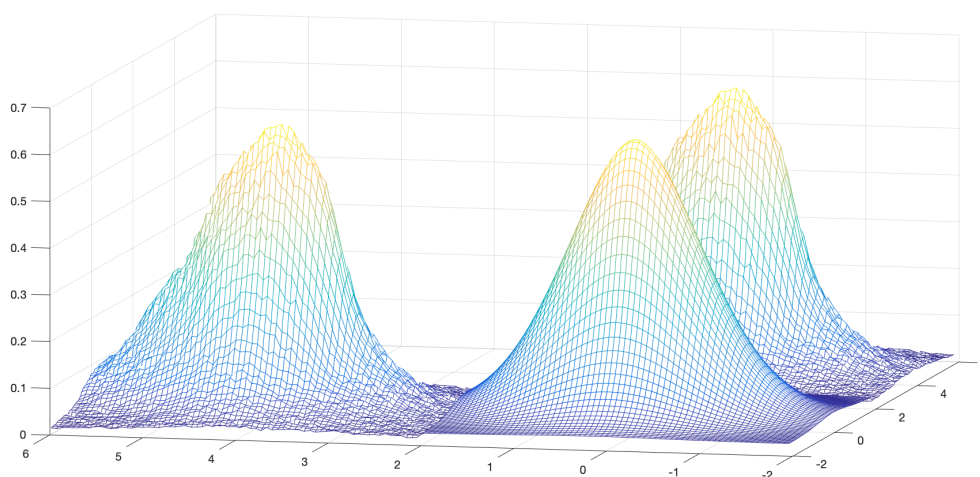


Figura 26 Exemple d'un ajust a una corba gaussiana simètrica

A partir d'aquesta equació, es busca el valor de les variables A , σ_x , σ_y , x_0 , y_0 , p i f_0 que fan que les diferències quadrades entre els punts experimentals i els calculats amb $f_1(x, y)$ siguin mínimes (paràmetres d'ajust a l'Annex 10.1).

Ràpidament s'observa que els píxels no són perfectament simètrics i l'energia tendeix a decaure més lentament a una de les direccions principals del pla de projecció (vegeu Figura 26); aquesta equació no permet descriure aquest comportament. És per això que es busca una equació capaç de fer-ho.

En concret s'utilitza una gaussiana asimètrica com la de l'equació:

$$f_2(x, y) = A \left(\frac{\alpha_x \cdot \alpha_y \cdot e^{-\left[\left(\frac{1}{k_x} \ln \left[1 - k_x \frac{(x-x_0)}{\alpha_x} \right] \right)^2 + \left(\frac{1}{k_y} \ln \left[1 - k_y \frac{(y-y_0)}{\alpha_y} \right] \right)^2 \right]^p}}{[\alpha_x - k_x \cdot (x-x_0)] \cdot [\alpha_y - k_y \cdot (y-y_0)]} \right) + f_0 \quad (10)$$

Amb α_x , α_y , k_x i k_y coeficients d'ajust que descriuen la dispersió i asimetria de la gaussiana.

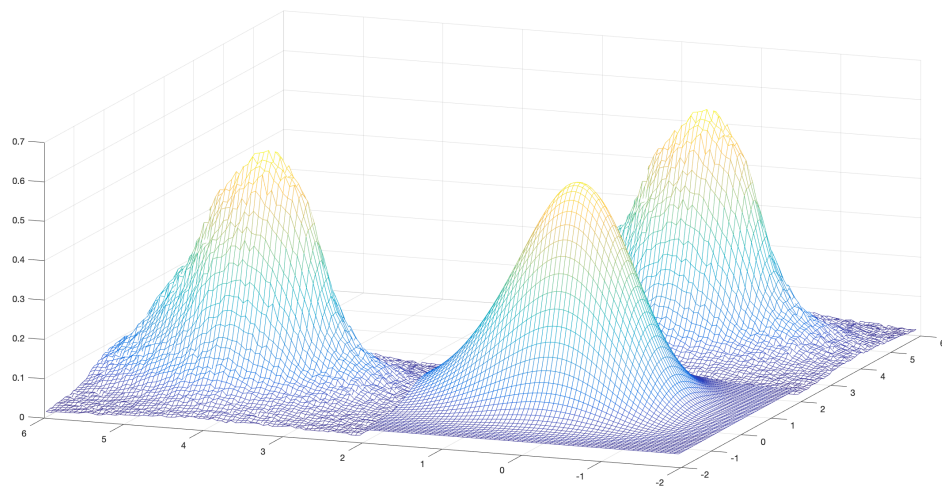


Figura 27 Exemple d'un ajust a una corba gaussiana asimètrica

Com s'ha fet amb la gaussiana simètrica es busca el valor de les variables A , α_x , α_y , k_x , k_y , x_0 , y_0 , p i f_0 que fan que les diferències quadrades entre els punts experimentals i els calculats amb $f_2(x, y)$ siguin mínimes (vegeu Annex 10.1 i Figura 27).

És fàcil veure que el coeficient de determinació (R^2) – paràmetre estadístic que mesura quina part de les dades pot explicar el model – és superior en el cas de la gaussiana asimètrica (vegeu Annex 10.1). Aquest fet corrobora que la segona equació s'ajusta millor a les dades experimentals.

S'observa que la direcció més asimètrica és la vertical, l'horitzontal és gairebé simètrica ($|k_y| \gg |k_x|$); aquest fet també pot ser causant d'anisotropies: els píxels presenten una deformació vertical que provoca un gradient d'intensitats d'il·luminació diferent en les dues direccions.

6.5.1. Verificació del model

Per verificar que el model s'ajusta a la realitat es simula la superposició de 4 píxels (separats per un píxel entre ells) i es compara amb una fotografia obtinguda amb cadascun dels enfocaments (vegeu Figura 28 i Figura 29). Es pot veure com les superposicions del model són molt semblants al comportament real del sistema de projecció. Les diferències que s'observen poden ser degudes en gran part a la variabilitat entre píxels. És aquí on es pot observar la importància de la utilització de gaussianes asimètriques: les intensitats lumíniques dels píxels superiors són majors a les dels inferiors a causa de l'aportació de l'asimetria vertical dels últims. Amb una gaussiana simètrica els quatre píxels rebrien la mateixa intensitat lumínica.

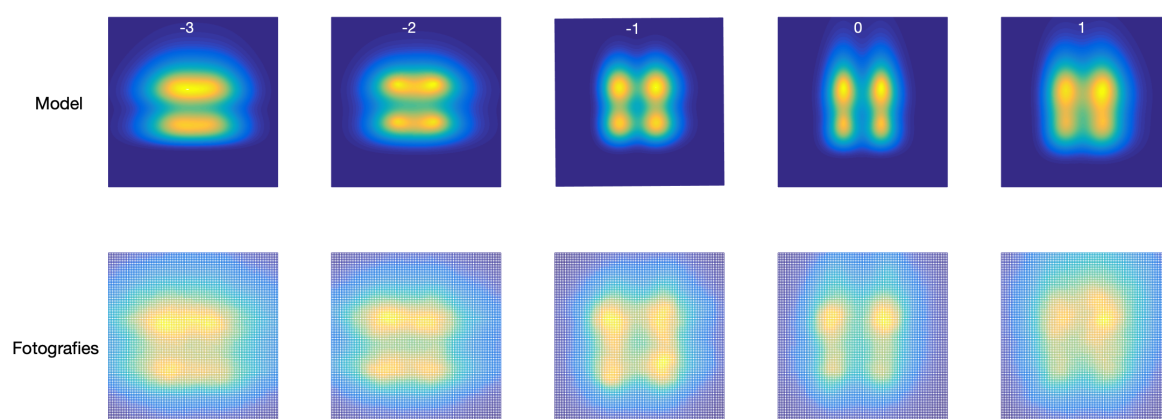


Figura 28 Comparació de les superposicions de quatre píxels blancs (model i sistema real) per les diferents posicions d'enfocament estudiades

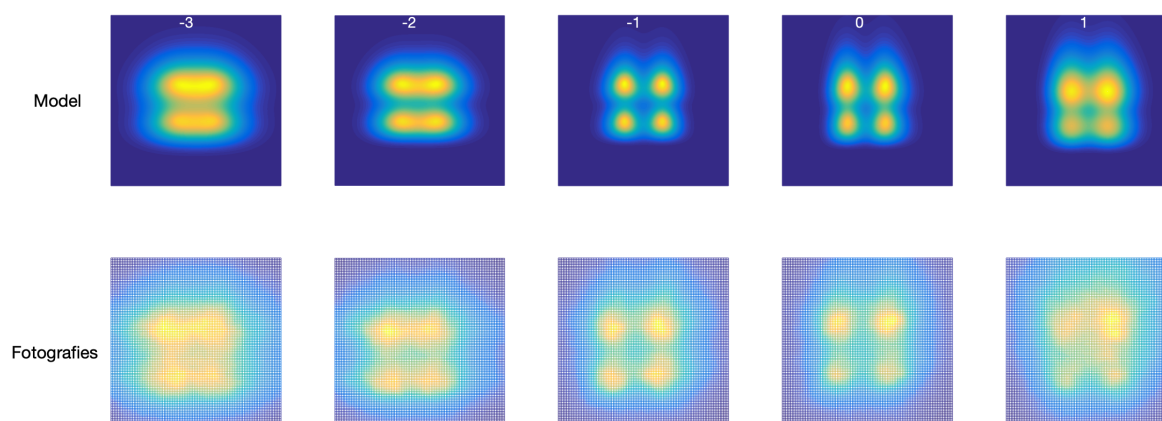


Figura 29 Comparació de les superposicions de quatre píxels blaus (model i sistema real) per les diferents posicions d'enfocament estudiades

7. Mesures amb microscopi confocal

Com que la superfície de projecció amb la qual s'han pres les imatges de l'apartat anterior no presenta les mateixes propietats òptiques que la resina, cal comprovar que les corbes obtingudes són vàlides per estudiar les dosis lumíniques rebudes per aquesta. Això es farà a través del mètode descrit en el següent subapartat basat en mesures experimentals de la rugositat (vegeu Figura 30) – mitjançant un microscopi confocal – d'una capa fabricada amb la impressora DLP utilitzada en aquest estudi.

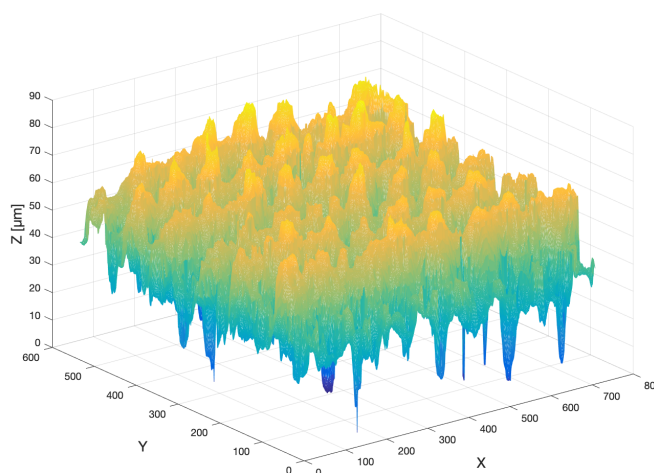


Figura 30 Mesures del microscopi confocal de la rugositat

7.1. Relació entre rugositat i intensitat lumínica

Per relacionar les dades de rugositat amb la intensitat lumínica s'utilitza el fet que tota la superfície en contacte amb la resina té el mateix grau de conversió, en concret el mínim pel qual la resina solidifica. A partir del model de solidificació (1) explicat en apartats posteriors s'arriba a la següent relació:

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_i = 1 - e^{-K \cdot I_i \cdot t \cdot e^{-\mu \cdot z_i}} \\ \phi_1 = \phi_2 \end{array} \right\} \rightarrow \frac{I_1}{I_2} = e^{\mu \cdot (z_1 - z_2)} \quad (11)$$

Amb ϕ_i el grau de conversió normalitzat del punt i , I_i la intensitat lumínica rebuda pel punt i , z_i la mesura en Z obtinguda amb el microscopi confocal del punt i , K el ritme de conversió del material i μ el coeficient d'atenuació. Aquests paràmetres estan esquematitzats en la Figura 31. A partir d'aquesta relació s'obtenen les intensitats lumíniques relatives de tots els punts de la superfície de projecció.

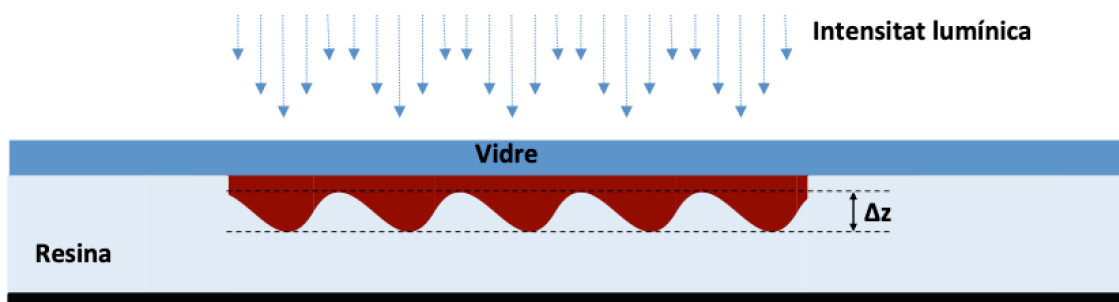


Figura 31 Esquema de la fabricació de les provetes analitzades amb el microscopi confocal

7.2. Obtenció de les relacions d'intensitats

El primer pas que es du a terme és suavitzar les dades, les mesures obtingudes tenen molt de soroll que en dificulta el tractat. En concret s'utilitza un filtre Savitzky-Golay que permet suavitzar les dades sense afectar els pics i les valls per tal de no distorsionar la informació rellevant. Seguidament es tracten les dades utilitzant el mètode explicat a l'apartat anterior, es tria una de les muntanyes corresponent a un píxel (i l'aportació lumínica dels píxels veïns) i se n'agafen $5 \cdot 5$ punts d'un dels seus quadrants; a través d'una doble simetria s'obté la corba de relacions d'intensitats de la Figura 32.

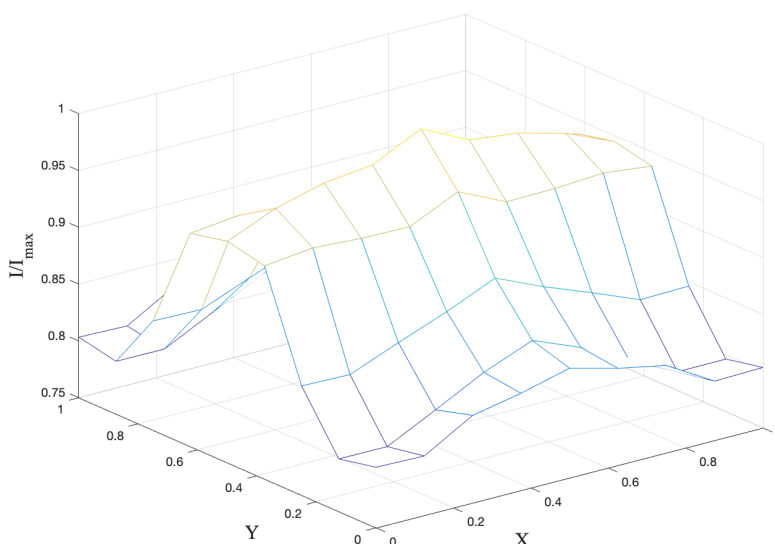


Figura 32 Relació d'intensitats de la superposició de píxels

Es comparen les corbes de la Figura 32 amb aquelles obtingudes estudiant la projecció dels píxels i s'observen diferències molt significatives (vegeu Figura 33). Les formes són semblants però les diferències de magnitud són molt grans: les variacions entre pics i valls són del voltant del 20% en el primer cas i a la vora del 10% en el segon.

Vistes aquestes diferències, la corba d'intensitats relatives obtinguda també s'utilitzarà com a entrada per trobar les propietats mecàniques puntuals del model d'elements finits.

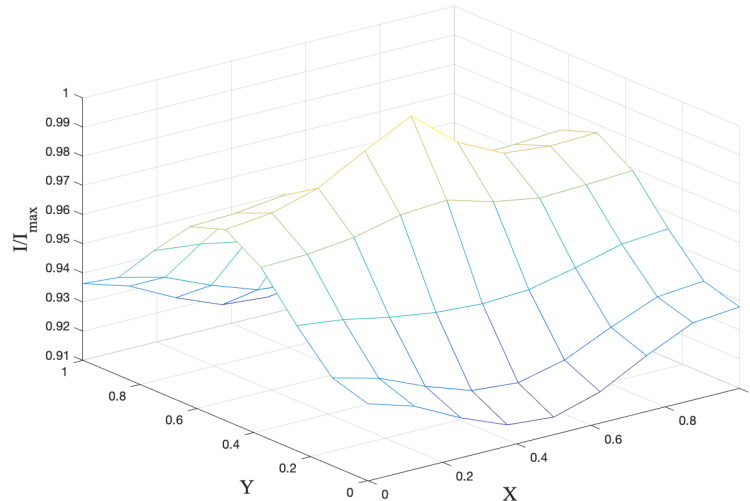


Figura 33 Relació d'intensitats pel cas de la superposició de l'ajust amb una gaussiana asimètrica d'un píxel blau amb posició d'enfocament -1

8. Assajos experimentals

Per obtenir la relació entre el grau de conversió i el mòdul elàstic del material fabricat es realitzen assajos de compressió a provetes amb diferents temps d'exposició. En concret es fabriquen 3 peces per cada temps d'exposició (7, 10 i 23 segons).

La confecció d'aquestes peces es realitza amb el muntatge de la Figura 34. S'imprimeixen les tres provetes amb el mateix temps d'exposició a la vegada el més centrades possible.

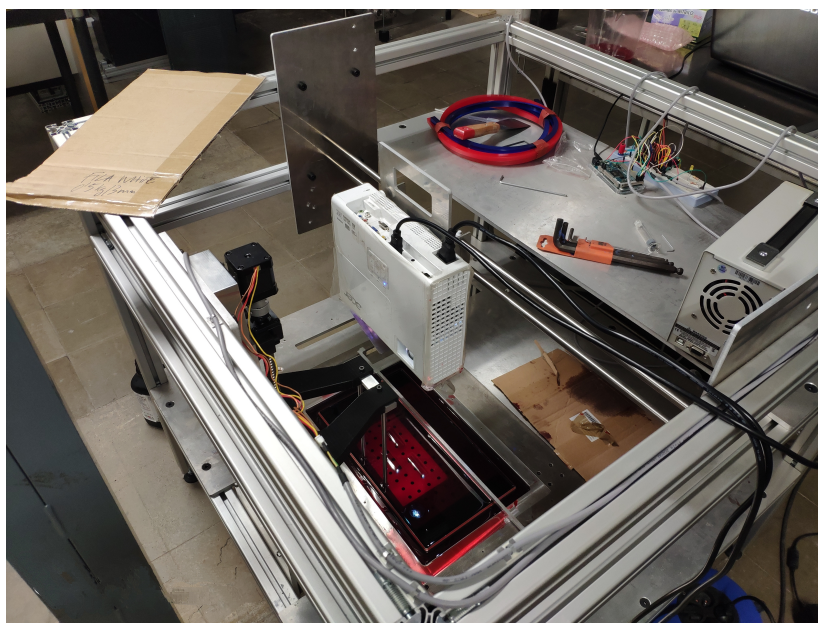


Figura 34 Muntatge de fabricació de les provetes

8.1. Anàlisi dels assajos a compressió

Un cop fabricades, s'assagen a compressió a una velocitat constant de 2,6 mil·límetres per minut. Es mesura la força i la deformació de dues maneres diferents. Per un costat es mesura la deformació total de la peça per trobar la deformació mitjana d'aquesta, això s'aconsegueix mesurant el temps i tenint en compte la velocitat de l'assaig. Per altre costat es pinten les provetes amb punts molt petits i se'n prenen fotografies al llarg de l'assaig per tal d'analitzar-les amb un software de correlació digital d'imatges (DIC) com es pot veure en la Figura 35. El segon mètode és més interessant que el primer, ja que permet mesurar deformacions transversals i longitudinals; a part d'això, es tracta d'un mètode de mesura directa (a diferència de les mesures realitzades amb el desplaçament de la creueta).

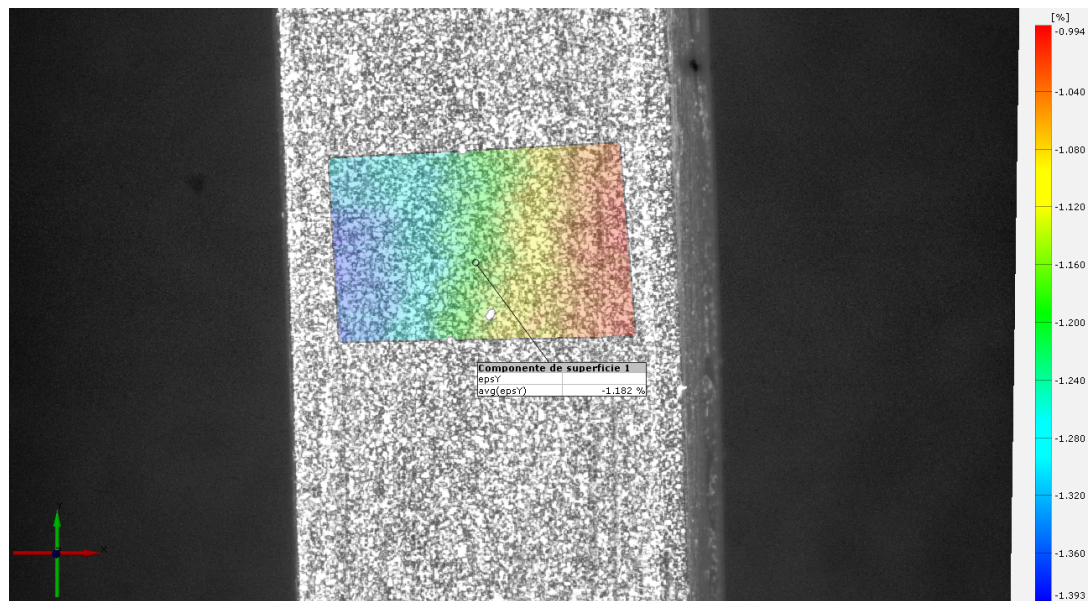


Figura 35 Exemple del tractament de dades gràfiques utilitzant un software de correlació digital d'imatges (DIC), la llegenda de la dreta mostra les deformacions en la direcció vertical en percentatge

Pel que fa a l'obtenció del mòdul de Young, es busca un mètode per tal d'obtenir resultats més robustos davant del soroll que presenten les dades obtingudes amb el DIC. En concret s'utilitza un algorisme que itera amb tots els punts de la corba tensió-deformació i en calcula el seu mòdul elàstic buscant el pendent que fa amb l'origen (vegeu Figura 36); el criteri de finalització és que la divisió entre l'últim mòdul elàstic calculat i el mig de tots els punts iterats fins al moment caigui per sota d'un límit.

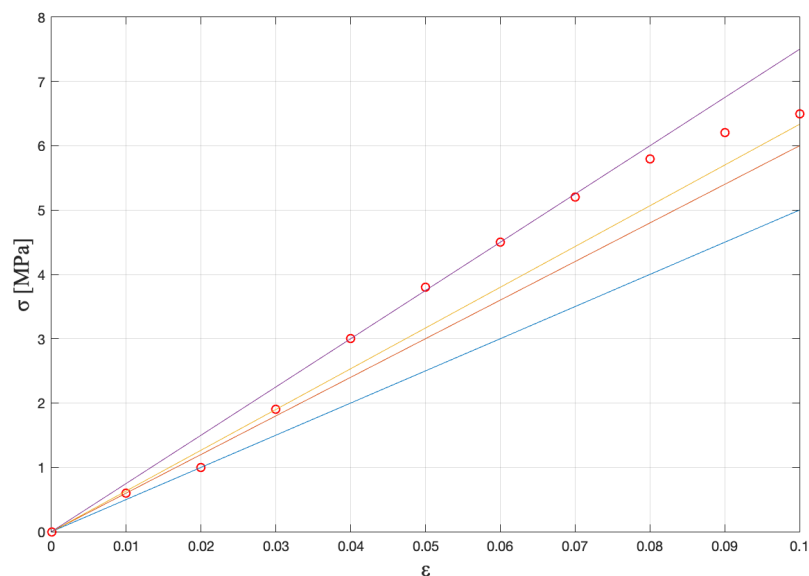


Figura 36 Il·lustració de 4 iteracions de l'algorisme

8.2. Resultats

En aquest apartat es mostren les gràfiques de tensió-deformació fent ús dels dos mètodes explicats i el càlcul del mòdul de Young utilitzant l'algorisme presentat (vegeu Figura 37, Taula 1 i Taula 2). Cal mencionar que la totalitat de les provetes van patir vinclament abans de finalitzar l'assaig.

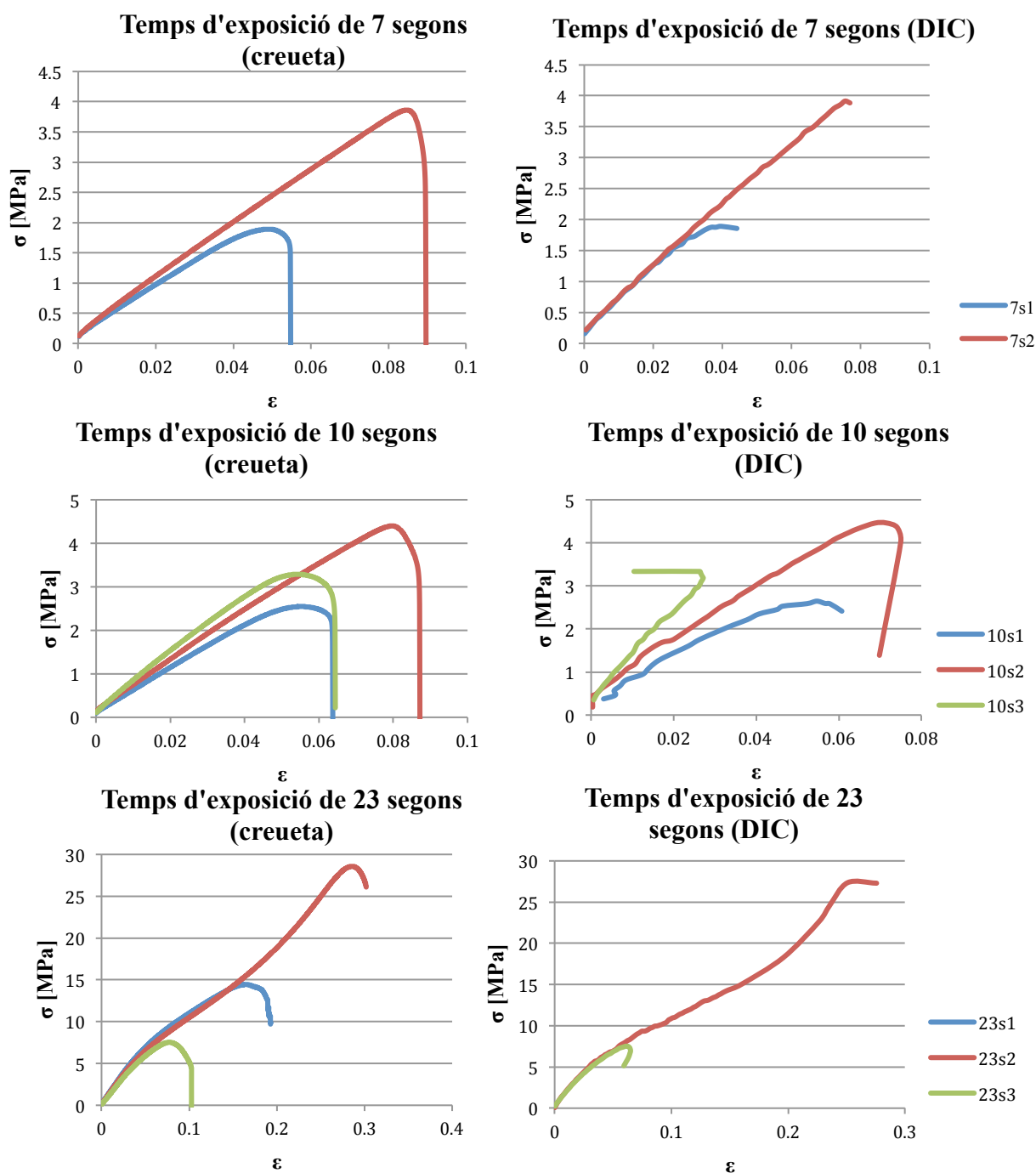


Figura 37 Corbes de tensió-deformació obtingudes pels dos mètodes

Com es pot veure en les gràfiques i en les taules només s'han assajat un total de dues provetes amb un temps d'exposició de 7 segons; això és degut a la dificultat que presenta la fabricació d'aquest tipus de provetes i per altra banda la poca variabilitat que es va observar entre les dues primeres. També es pot observar que no existeixen les dades del DIC de la primera proveta fabricada amb un temps d'exposició de 23 segons per un error en l'obtenció de les fotografies. Cal remarcar que no es tindrà en compte el mòdul de Young calculat amb el DIC de la proveta 10s3, ja que s'allunya considerablement de la resta; si s'observa la corba d'aquesta proveta, també es veu que presenta una forma diferent de les altres.

[MPa]	7s1	7s2	10s1	10s2	10s3	23s1	23s2	23s3
Creueta	40,93	46,53	50,17	56,51	67,83	141,9	134,7	121,6
DIC	50,37	51,63	43,76	64,53	404,7	-	170,3	155,3

Taula 1 Mòduls de Young calculats a partir dels assajos de tensió-deformació

Es calculen unes mitjanes de:

[MPa]	7s	10s	23s
Creueta	43,73	58,17	123,7
DIC	51,00	54,14	162,8

Taula 2 Mitjana dels mòduls de Young calculats per cada temps d'exposició

8.3. Anàlisi dels graus de conversió

Per validar el model utilitzat per predir el grau de conversió de les provetes es fa ús d'un espectròmetre infraroig de transformada de Fourier (FTIR) per obtenir l'absorció a diverses freqüències de l'espectre electromagnètic d'algunes de les provetes fabricades. Els resultats de l'anàlisi es poden observa a la Figura 38.

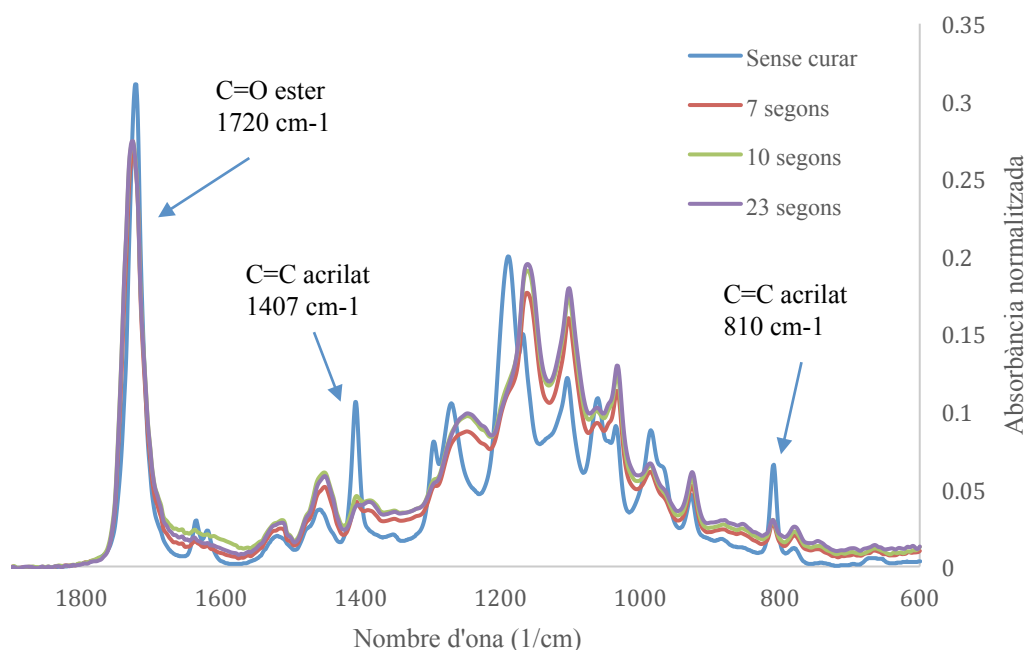


Figura 38 Absorbància de les diferents mostres per diferents nombres d'ona

Es coneix que l'absorbància dels nombres d'ona de 810 cm^{-1} i 1407 cm^{-1} són característics dels dobles enllaços entre carbonis d'acrilats; en concret l'àrea d'aquests pics decreix amb la concentració d'aquests enllaços moleculars d'acord amb la relació següent:

$$\phi = 1 - \frac{\text{Àrea}_{pic} - \text{Àrea}_{pic\ 100\%}}{\text{Àrea}_{pic\ 0\%} - \text{Àrea}_{pic\ 100\%}} \quad (12)$$

Amb Àrea_{pic} l'àrea del pic de la mostra estudiada, $\text{Àrea}_{pic\ 100\%}$ l'àrea del pic d'una mostra amb grau de conversió del 100% i $\text{Àrea}_{pic\ 0\%}$ l'àrea del pic d'una mostra amb grau de conversió del 0% (resina sense exposar).

A la figura també es senyala el pic de 1720 cm^{-1} que és invariant en la reacció estudiada i per tant s'utilitza per normalitzar les absorbàncies de les diferents mesures.

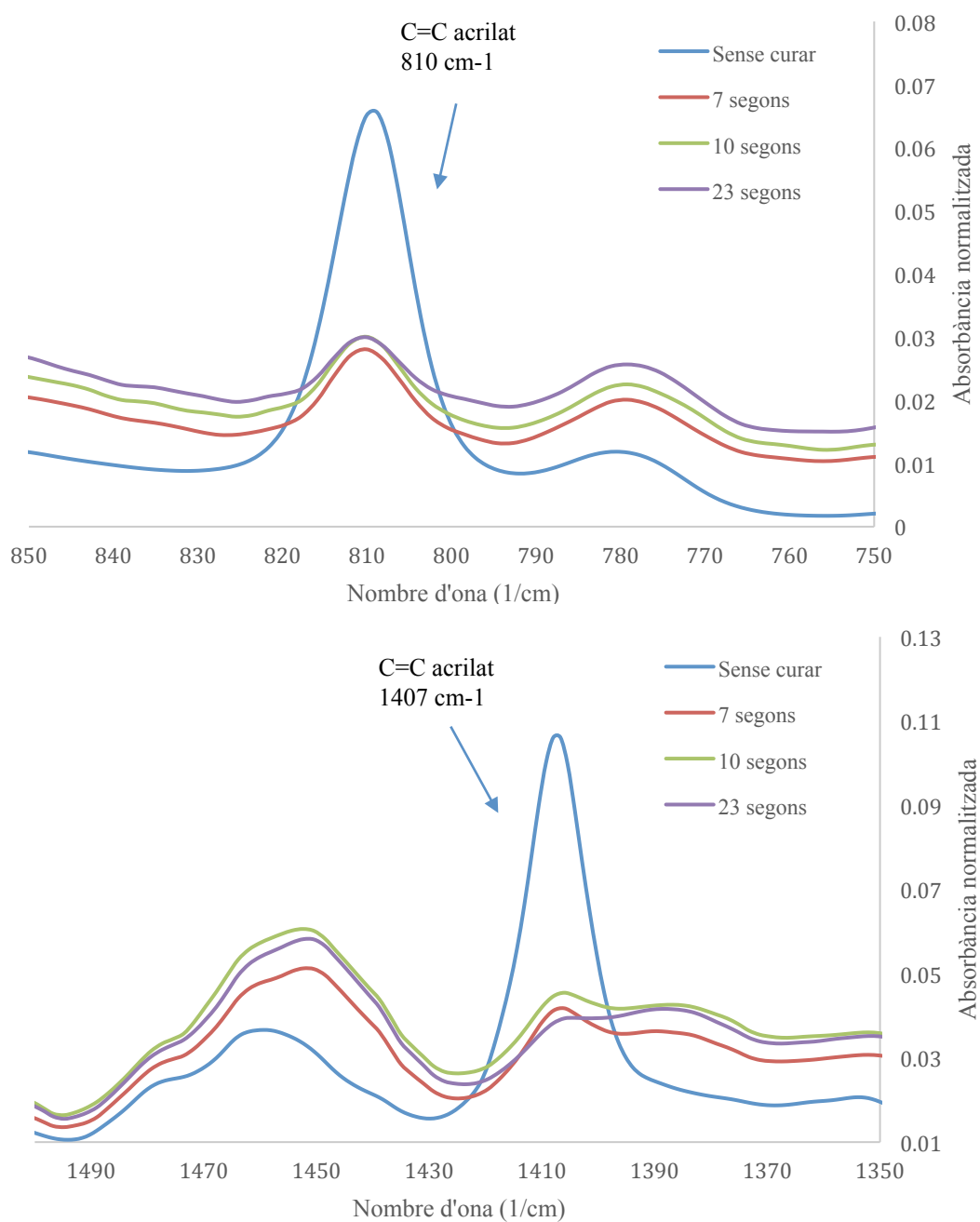


Figura 39 Pics d'absorbància interessants de les diferents mostres

Si calculem les àrees dels pics esmentats (vegeu Figura 39), podem trobar la relació entre les concentracions dels dobles enllaços que són una mesura directa del grau de conversió que presenten les mostres. Prenent com a referència l'àrea de la mostra amb un temps d'exposició de 23 segons ($\text{Àrea}_{\text{pic } 100\%} = \text{Àrea}_{\text{pic } 23s}$):

t [s]	Àrea pic de 810 cm^{-1}	Àrea pic de 1407 cm^{-1}	Relació conv. 810 cm^{-1}	Relació conv. 1407 cm^{-1}	Relació model	Relacions noves
0	0,793	1,5266	0	0	0	0
7	0,186	0,208	0,957	0,943	0,854	0,911
10	0,174	0,189	0,976	0,957	0,936	0,968
23	0,159	0,129	1	1	1	1

Taula 3 Àrees dels pics i relacions de graus de conversió extretes de l'anàlisi amb FTIR, del model actual i del model ajustat

Tot i que aquests resultats estan subjectes a errors experimentals que poden arribar a ser força significatius, s'observa que les diferències entre les relacions experimentals i les que produeix el model són força elevades (vegeu Taula 3). Aquest fet indica que el model de conversió probablement no està ben ajustat.

Si es recalculen els paràmetres d'ajust del model de conversió de l'apartat 5.1 per tal d'obtenir uns graus de conversió mitjans més semblants als trobats, s'arriba a les relacions de l'última columna de la taula anterior. Aquests paràmetres són els utilitzats per les simulacions finals d'aquest treball.

8.4. Ajust

A partir de la mitjana dels mòduls de Young i els graus de conversió experimentals, s'ajusten els resultats obtinguts a una corba com la de l'apartat 5.2. En concret s'ajusta a una corba de tres trams que té en compte que el material no solidifica per graus de conversió inferiors al 30% (vegeu Figura 40). El tram més important és l'últim, ja que és el de les conversions de les peces fabricades.

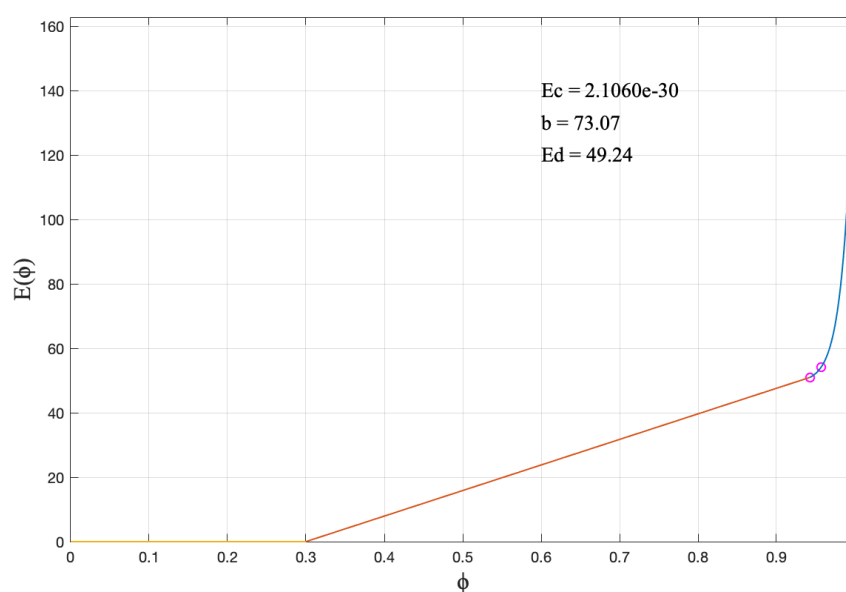


Figura 40 Ajust de la relació entre el mòdul de Young i el grau de conversió utilitzant les mitjanes del DIC

Posteriorment es comprova utilitzant el model d'elements finits explicat a l'apartat 5 si aquesta corba genera uns materials que es comporten com els assajos. S'obtenen els següents resultats:

Temps d'exposició [s]	7	10	23
Model [MPa]	48,41	52,94	159,5
Assajos [MPa]	51,00	51,14	162,8
Ràtio	0,949	1,04	0,980

Taula 4 Comparació del mòdul de Young obtingut amb les simulacions del model i els assajos experimentals

Si es comparen amb els resultats dels assajos (vegeu Taula 4), s'observa que el model es comporta de manera molt semblant; tot i això és incapaç d'explicar la variabilitat entre les provetes fabricades amb el mateix temps d'exposició. Aquest fet indica que hi ha algun factor que no s'està considerant, com per exemple les diferències energètiques entre píxels degudes a la posició en la qual van ser fabricades les diferents provetes.

9. Simulacions del model

9.1. Simulacions preliminars i evolució dels models

Les primeres simulacions que es realitzen utilitzen la corba del material de la Figura 13 extreta de l'estudi [9] o el model i paràmetres de la investigació [15] i es pren com a forma dels píxels uns ajustos realitzats en estudis previs. Aquestes simulacions no aconsegueixen modelar les anisotropies observades als assajos experimentals anteriors.

Vists els resultats es decideix fer l'anàlisi del sistema de projecció per corroborar si les intensitats lumíniques amb les quals s'està treballant descriuen bé el sistema; també es busca comprovar si hi ha factors que no s'han tingut en compte, com són la dificultat de l'enfocament o la distorsió dels píxels a mesura que s'allunyen del centre. Un cop realitzades les superposicions de píxels i obtingudes les dosis rebudes per la resina en la superfície de projecció s'analitzen les formes resultants i s'observa el següent:

- Les dosis tenen formes d'ones amb pics i valls amb el màxim al centre del píxel.
- Les valls són de diferent valor en les dues direccions principals de projecció.
- En la direcció X les valls sempre són menors que en la direcció Y.

De totes aquestes observacions se'n deriva que l'anisotropia segurament és deguda a aquests canvis entre les dosis mínimes d'una direcció i una altra (i per tant de les propietats del material en aquestes dues direccions). Així doncs es decideix fer les simulacions per aquell cas on les diferències entre els pics i les valls són més elevades dels ajustos dels píxels blaus: l'enfocament en la posició -1 amb unes diferències entre pic i vall del 9,1%. És fàcil veure en els apartats anteriors que aquesta també és la posició on sembla que els píxels estan més ben enfocats i és probablement la posició al voltant de la qual es van fabricar les provetes en els assajos experimentals anteriors. Les diferències entre graus de conversió que s'obtenen són semblants a les que s'havien utilitzat en les simulacions anteriors i produeixen els mateixos resultats.

Per tal de conèixer quin pot ser el motiu es decideix simplificar el model: el primer que s'intenta és ignorar les diferències de conversió al llarg de l'eix Z; com això tampoc resulta en unes diferències significatives de les propietats en les diferents direccions de càrrega es simplifica el model encara més considerant que només hi ha dos materials, un de completament convertit i un de poc convertit (vegeu Figura 41); amb aquest últim model es busca conèixer, en el millor dels casos, quines propietats haurien de tenir aquests dos materials per tal que les diferències siguin significatives.

Per la simplicitat d'aquest últim model es decideix solucionar-lo amb teoria de mecànica dels medis continus. En les compressions al llarg de l'eix Y i Z tots els materials presenten el mateix desplaçament però diferents estats de tensió; en canvi pel cas de la compressió al llarg de l'eix X les tensions de tota la peça són les mateixes, però els desplaçaments no ho són. Les equacions que modelen aquest problema són:

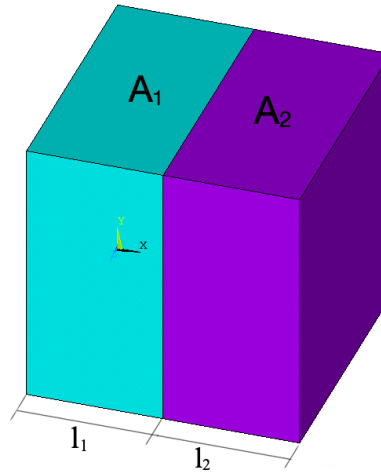


Figura 41 Model de dos materials

Compressió en Y i Z:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon \rightarrow \begin{cases} \sigma_1 = E_1 \cdot \varepsilon \\ \sigma_2 = E_2 \cdot \varepsilon \end{cases} ; \begin{cases} F_1 = \sigma_1 \cdot A_1 \\ F_2 = \sigma_2 \cdot A_2 \end{cases} \rightarrow \sigma_y = \frac{F_1 + F_2}{A_1 + A_2}$$

$$E_y = \frac{E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2}{A_1 + A_2} \quad (13)$$

Compressió en X:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma \rightarrow \begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E_1} \\ \varepsilon_2 = \frac{\sigma}{E_2} \end{cases} ; \begin{cases} \delta_1 = \varepsilon_1 \cdot l_1 \\ \delta_2 = \varepsilon_2 \cdot l_2 \end{cases} \rightarrow \varepsilon_x = \frac{\varepsilon_1 \cdot l_1 + \varepsilon_2 \cdot l_2}{l_1 + l_2}$$

$$E_x = \frac{E_1 \cdot E_2 \cdot (l_1 + l_2)}{l_1 \cdot E_2 + l_2 \cdot E_1} \quad (14)$$

Amb E el mòdul elàstic, ε les deformacions unitàries, σ les tensions, F la suma de les forces resultants, A l'àrea del pla perpendicular a la compressió i l la longitud del material en la direcció de la compressió.

Si es representen aquestes relacions, s'obté el gràfic de la Figura 42:

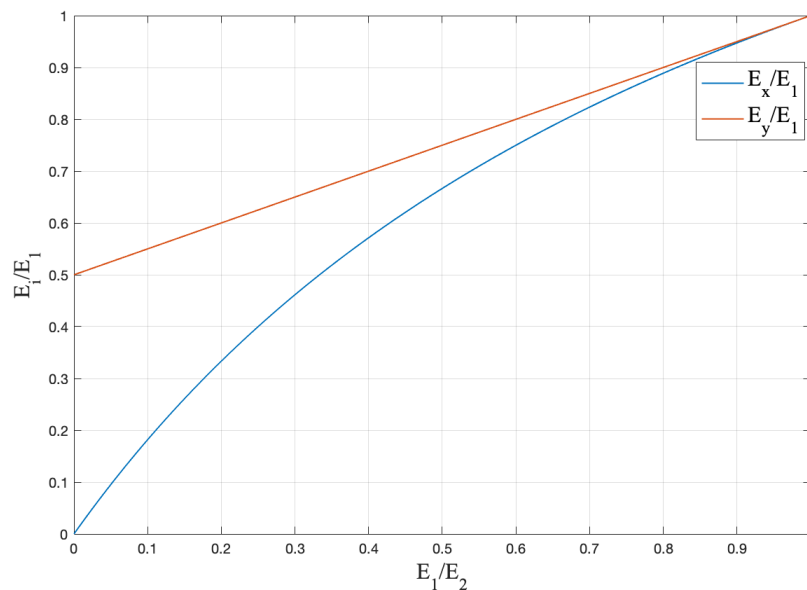


Figura 42 Com varien els mòduls elàstics en dues direccions per diferents relacions de mòduls de Young del model (s'ha pres $A_1 = A_2$ i $l_1 = l_2$, on les diferències són més notables)

En aquest gràfic s'observa que quan la relació entre E_1 i E_2 és 0,5 (el material més convertit té un mòdul elàstic que és el doble de l'altre) l'anisotropia es troba al voltant del 10%.

Per simplicitat, el model anterior no té en compte que els materials també es deformen en les direccions no comprimides; és per això que es decideix simular aquest problema també amb el mètode dels elements finits per obtenir resultats més semblants als reals (vegeu Figura 43).

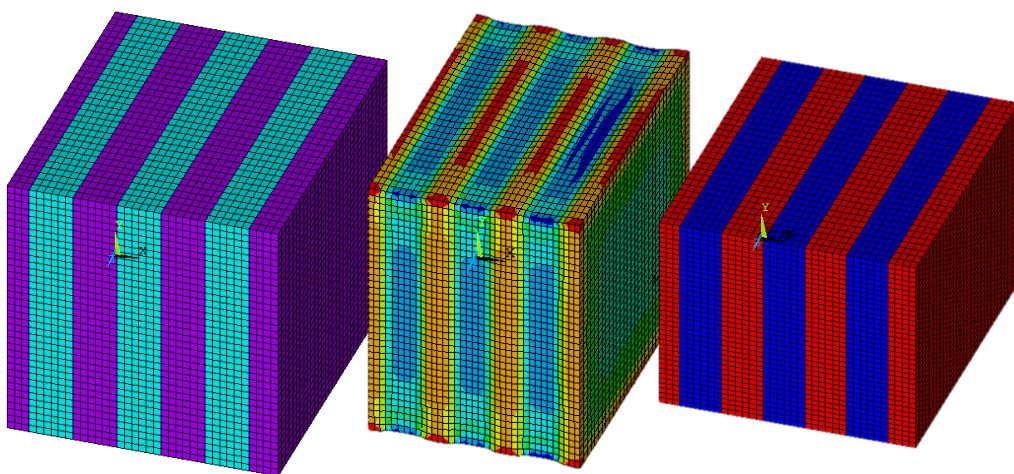


Figura 43 Model de dos materials, compressió en X i compressió en Y

Es conclou que amb un coeficient de Poisson de 0,45 cal que el mòdul elàstic del material poc convertit sigui gairebé un terç de l'altre per tal d'obtenir una anisotropia del 10% entre les direccions X i Y. En aquest punt també s'observa que el coeficient de Poisson és un factor a tenir en compte, ja que la seva variació provoca canvis en els resultats; més endavant s'introdueixen aquestes variacions al model complet però no s'observa que en aquest cas les diferències siguin gaire grans.

També s'introdueixen models que tenen en compte la plastificació del material per tal de descriure els comportaments que van tenir les provetes als assajos de compressió. Amb aquests models tampoc s'obtenen diferències significatives en els mòduls elàstics de les direccions principals.

Com a mètode alternatiu es busca la relació d'intensitats de les superposicions amb el mètode descrit a l'apartat 7 a partir de les mesures de rugositat obtingudes mitjançant un microscopi confocal. Amb aquestes mesures s'obtenen unes variacions de graus de conversió més grosses però segueixen sense poder justificar els grans canvis de mòdul de Young que explicarien l'anisotropia del material.

Com que totes les proves realitzades fins ara utilitzen relacions de grau de conversió i mòdul elàstic extretes d'altres estudis i no es coneix com es comporta la resina en la qual es basa aquest treball, es decideix dur a terme una sèrie d'assajos per tal de fer un ajust i mirar si els canvis de mòdul de Young poden ser explicats d'aquesta manera.

Un cop obtingut aquest ajust es comprova que les simulacions es comporten com el material als assajos de compressió realitzats. Seguidament s'utilitza aquest ajust per tal de simular els assajos de compressió dels estudis previs; en el següent apartat s'expliquen aquestes simulacions.

9.2. Simulacions finals

En aquest apartat s'ensenyaran les simulacions més significatives com a exemple de totes les dutes a terme. En concret s'explicaran les últimes, que fan ús dels assajos experimentals d'aquest estudi per tal de definir les propietats mecàniques puntuals del material.

Canviant els paràmetres per reflectir les diferències entre la resina utilitzada en els assajos d'aquest treball i els estudis anteriors es busquen els graus de conversió teòrics de les provetes dels assajos previs i les conseqüents propietats del material puntuals. Amb aquestes propietats es fan un total de tres simulacions: una amb un model de material lineal, una amb un model bilineal i una amb materials que segueixen la relació de Ramberg-Osgood.

9.2.1. Simulació amb model lineal

La simulació més senzilla és la del model lineal, s'arriba als següents resultats:

	$E_x [MPa]$	$E_y [MPa]$	$E_z [MPa]$
Model [MPa]	112,8	113,0	115,8
Assajos previs [MPa]	206	248	255

Taula 5 Comparació entre els mòduls de Young obtinguts amb les simulacions del model d'elements finits i els assajos experimentals previs

Les diferències entre el model i els assajos previs són molt grans, però s'ha de tenir en compte que la resina amb la que s'han fabricat les provetes utilitzades pels assajos que han permès ajustar la relació entre el grau de conversió i el mòdul elàstic no és exactament la mateixa que es va utilitzar per fer els assajos previs. Tot i això podem comparar el grau d'anisotropia que proporciona el model (gairebé nul) amb el que proporcionen les dades dels assajos experimentals previs (de vora el 20%). És fàcil veure que aquest model no pot explicar les anisotropies observades.

9.2.2. Simulació amb model bilineal

Per la segona simulació el primer que es fa és buscar com varien tots els paràmetres del model. Es fa ús de les gràfiques tensió-deformació per tal de trobar el límit elàstic dels materials. En concret es fa ús de la segona gràfica de tensió-deformació obtinguda amb el DIC d'una de les provetes fabricades amb un temps d'exposició de 23 segons (vegeu Figura 44); els altres assajos no proporcionen informació sobre comportaments plàstics, ja que les provetes van vinclar abans d'arribar al límit elàstic. És per això que es farà variar linealment amb el mòdul de Young.

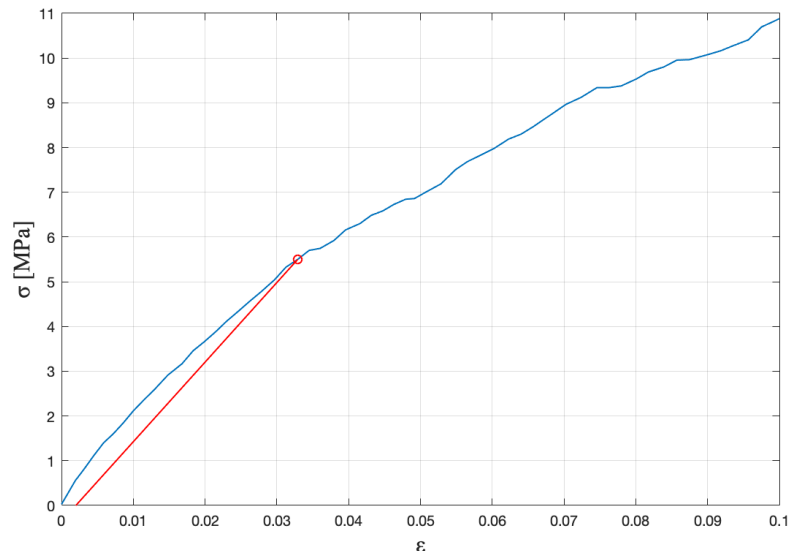


Figura 44 Càlcul del límit elàstic (es busca tensió per la qual es té una deformació plàstica del 0,2%)

La corba de tensió-deformació que s'obté és la de la Figura 45:

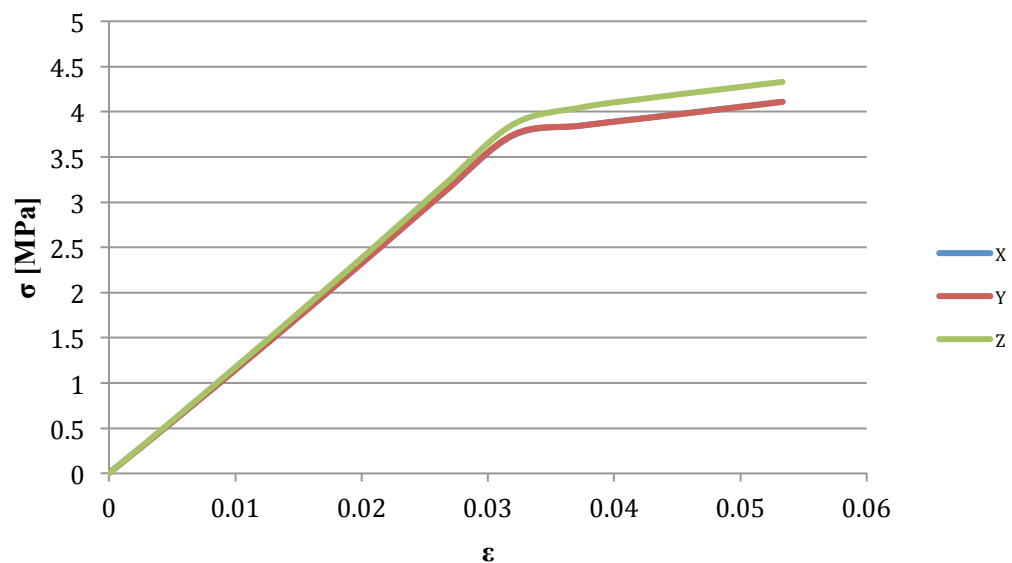


Figura 45 Corba de tensió-deformació de la simulació amb un model bilineal (les tensions de la compressió en X les tapen les de la compressió en Y)

No s'observa anisotropia pel que fa al pla XY, entre aquest pla i la direcció Z sí que s'observen diferències però tampoc són molt grans. Si comparem aquest gràfic amb els assajos realitzats, veurem que el model bilineal no aconsegueix descriure el comportament del material de manera fidel.

9.2.3. Simulació amb el model Ramberg-Osgood

En els assajos s'ha observat que el comportament del material no és lineal, com molts polímers es comporta de manera viscoelàstica (les tensions no només depenen de la deformació, també depenen de la velocitat d'aquesta); com tots els assajos s'han fet a velocitat constant es pretén modelar amb la relació de Ramberg-Osgood el comportament viscoelàstic de la resina per deformacions baixes.

Per obtenir els paràmetres que descriuen aquesta relació es prenen les dades d'un dels assajos de compressió de les provetes amb temps d'exposició de 23 segons, el mateix que a l'apartat anterior (vegeu Figura 46). A la corba tensió-deformació s'hi ajusta l'equació explicada a l'apartat 5.2 (Model Ramberg-Osgood). Els únics paràmetres que es fan variar linealment amb el mòdul de Young són E_0 i σ_0 , això és degut al fet que no es coneix com varien els altres paràmetres. Es comprova si el comportament amb tots els temps d'exposició utilitzats és semblant al de l'assaig de compressió. Com el comportament és força similar, els paràmetres i la seva variació es donen com a bons (vegeu Figura 47).

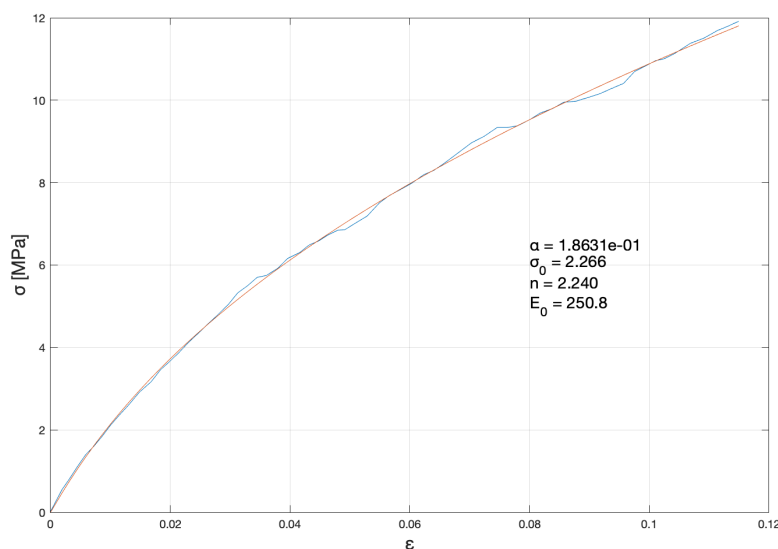


Figura 46 Ajust de la corba de tensió-deformació de la proveta 23s2 amb l'equació de Ramberg-Osgood

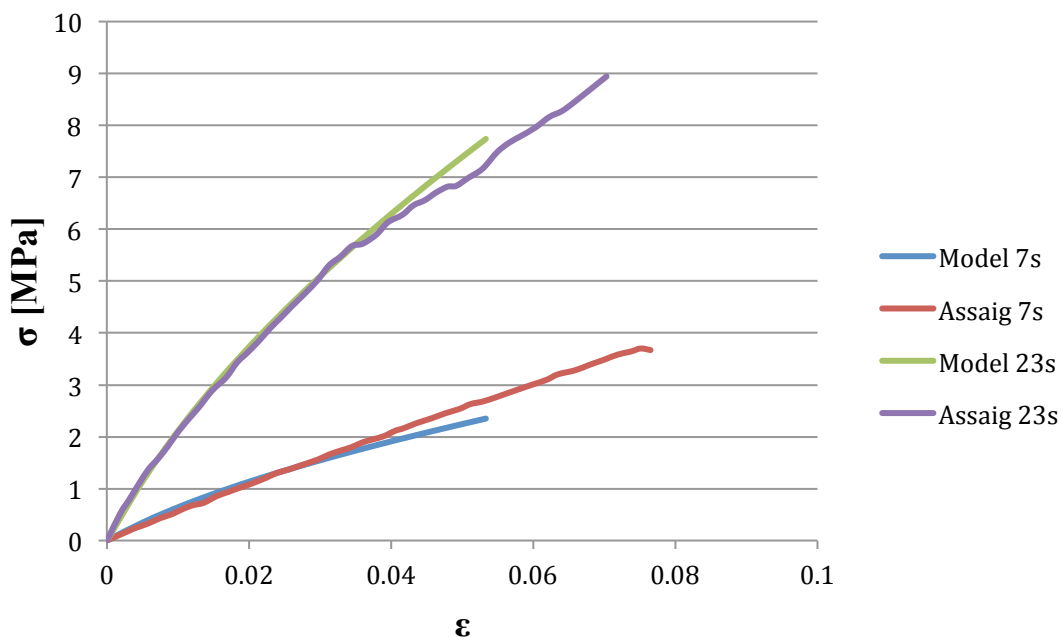


Figura 47 Superposició dels assajos de compressió de les provetes fabricades amb 23 i 7 segons amb els resultats de la simulació d'aquests assajos utilitzant el model explicat

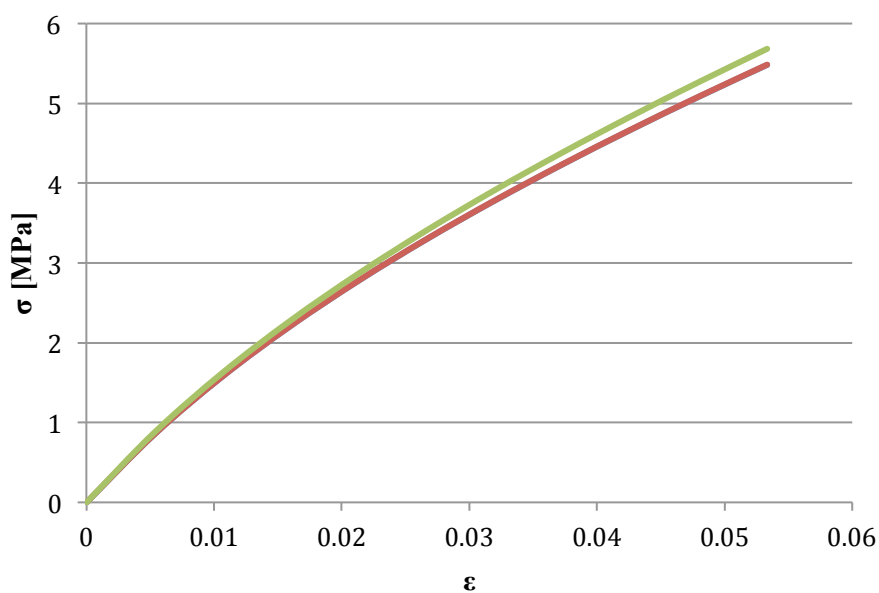


Figura 48 Corba de tensió-deformació obtinguda mitjançant el model d'elements finits amb la relació de Ramberg-Osgood (les tensions de la compressió en la direcció X les tapen les de la compressió en la direcció Y)

Com s'observa a la Figura 48, una vegada més les diferències entre les direccions principals X i Y són inapreciables, les de la direcció Z sí que són visibles però no són gaire importants. En concret s'observen unes diferències que ronden el 3% per l'últim cas. Aquest fet pot ser explicat per la variació més gran del grau de conversió al llarg de la direcció Z provinent de l'atenuació de les dosis lumíniques rebudes per les capes més llunyanes de la superfície de projecció.

Aquest model és el que més s'ajusta a la realitat, tot i això es desconeix si és capaç de modelar el comportament viscoelàstic que presenta el material. Un següent pas podria ser buscar models de materials més complexos que introduïssin la variable temps en les simulacions.

Seguidament s'analitzen les tensions generades en les direccions de compressió per veure com es comporta el conjunt de materials.

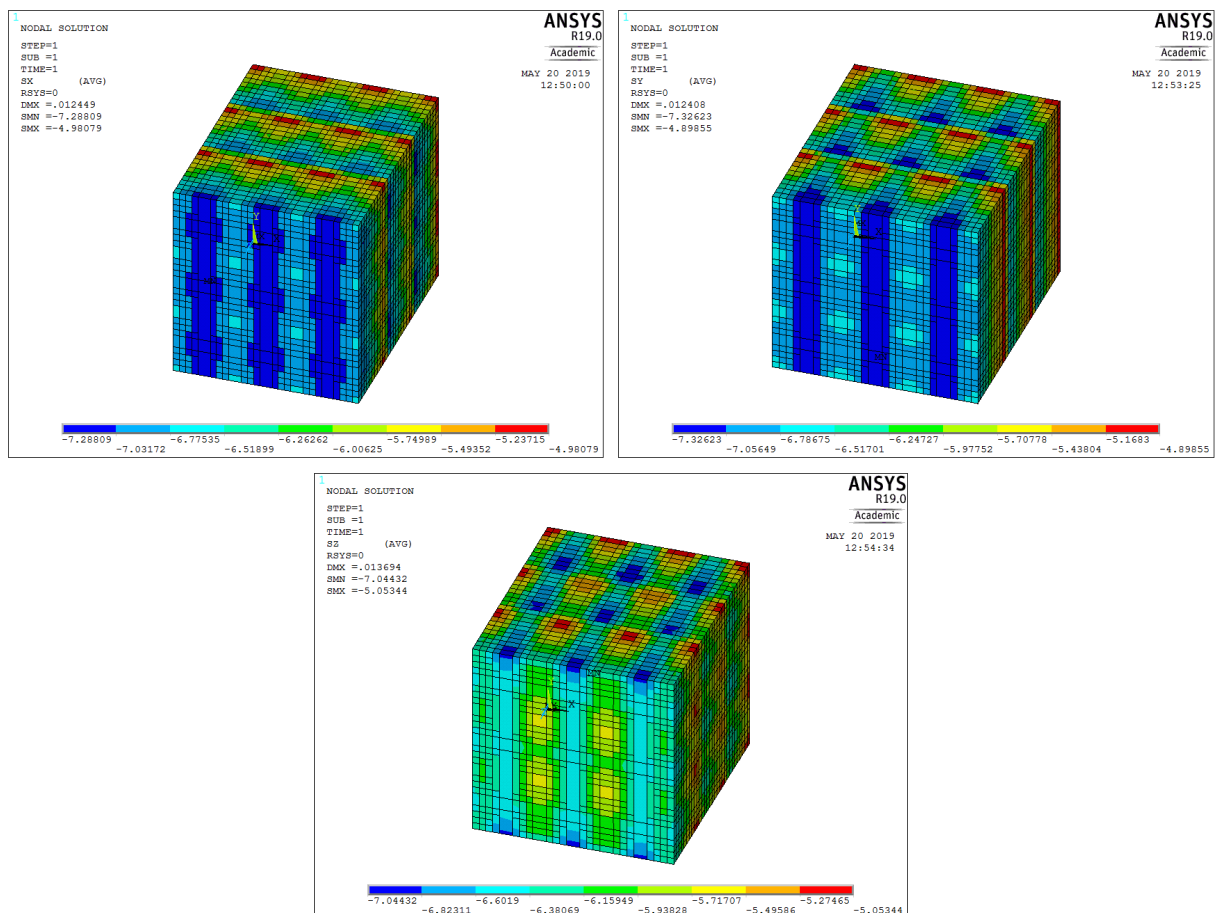


Figura 49 Tensions en X, Y i Z de les simulacions de compressions al llarg de les direccions principals X, Y i Z respectivament

És interessant veure com la distribució de tensions de les compressions al llarg dels eixos X i Y presenten formes verticals (vegeu Figura 49): en aquesta direcció hi ha una menor variació del grau de conversió i també són les zones que tenen un mòdul de Young més elevat. Aquest fet podria ser el causant de l'anisotropia observada als assajos experimentals previs, però com s'ha explicat en apartats anteriors caldria que les diferències entre mòduls de Young entre les zones més i menys convertides fossin bastant més grans del que es conclou que són.

Conclusions

A partir d'una extensa recerca bibliogràfica s'han definit i ajustat un seguit de models que permeten descriure el procés de solidificació i adquisició de les propietats mecàniques puntuals que experimenta la resina fotosensible utilitzada en aquest treball. En concret s'han estudiat models per explicar com les dosis lumíniques s'acumulen amb l'efecte de les capes, la relació entre aquestes dosis i el grau de conversió que obté el material i per últim la variació de les propietats mecàniques puntuals en relació amb el grau de conversió.

Seguidament s'ha analitzat el sistema de projecció utilitzat en la màquina de fabricació DLP; per fer-ho ha calgut buscar amb quina superfície de projecció es poden captar les formes dels píxels amb més fidelitat, s'ha arribat a la conclusió que una cartolina o paper blancs proporcionen els millors resultats. Amb l'estudi dels píxels s'han observat dos fenòmens que poden ser causants d'anisotropia: la gran dificultat que comporta enfocar el projector i la distorsió dels píxels menys centrats. També s'han obtingut uns ajustos dels píxels del sistema per tal d'introduir-los en les simulacions.

Com a mètode alternatiu per obtenir les corbes de lluminositat s'han realitzat unes mesures amb un microscopi confocal de la rugositat d'una mostra obtinguda amb una sola exposició amb la màquina de fabricació DLP. Aquestes mesures han permès obtenir les relacions entre les intensitats lumíniques de la superfície de projecció. S'han comparat amb les obtingudes amb mètodes òptics i es conclou que com la superfície de projecció amb la qual s'han obtingut no presenta les mateixes propietats òptiques que la resina de fabricació aquest mètode no és vàlid per captar amb precisió les relacions d'intensitats dels píxels; sí que ho és per captar la seva forma aproximada i observar les deformacions provocades per paràmetres com l'enfocament i la posició.

S'han realitzat assajos de compressió a provetes fabricades amb diferents temps d'exposició per tal d'ajustar els paràmetres dels models matemàtics utilitzats en el model d'elements finits. També s'ha analitzat el grau de conversió que presenten aquestes provetes per tal de validar el model de conversió utilitzat. S'han observat diferències significatives i s'ha optat per reajustar el model.

Per posar punt final al treball s'han explicat totes les simulacions i càlculs realitzats i s'han mostrat els resultats obtinguts amb els últims models. Les primeres simulacions utilitzen paràmetres extrets d'assajos anteriors o d'altres estudis i no permeten explicar l'anisotropia observada; amb les anàlisis del sistema de projecció s'observa que les dosis tenen formes d'ones amb pics i valls amb el màxim al centre del píxel i que les valls en la direcció Y són més profundes que les de la direcció X. Amb un model simplificat i càlculs que utilitzen teoria de mecànica dels medis continus s'arriba a la conclusió que les variacions del mòdul de

Young que explicarien una anisotropia del 10% són majors al 60% entre els punts amb major i menor conversió.

Pel que fa a les simulacions finals es conclou que el model que millor descriu el comportament dels assajos de compressió és el que fa ús de la relació de Ramberg-Osgood, ja que permet modelar tant la deformació plàstica com la lenta transició cap a aquesta.

Aquest treball conclou que amb els models utilitzats i les dades obtingudes dels assajos no és possible explicar l'anisotropia observada en estudis previs d'aquest material; sí que s'aconsegueixen explicar les diferències de mòduls de Young que s'observen per diferents temps d'exposició. De l'anàlisi del sistema de projecció se'n poden extreure alguns fets que poden ajudar a explicar la dificultat de recrear l'anisotropia trobada en els assajos anteriors: la gran variabilitat d'aquests assajos pot ser explicada per la gran dificultat de metoditzar l'enfocament del sistema de projecció i per la deformació important dels píxels menys centrals; en aquest estudi les provetes no van ser impreses totes a la mateixa posició i aquest fet podria explicar la gran variabilitat de les dades obtingudes i fins i tot justificar l'anisotropia trobada. Per altra banda els models utilitzats suposen una distribució de l'energia lumínica entre píxels completament uniforme, caldria estudiar si la deformació dels píxels a causa de l'efecte de l'enfocament i la posició també té un impacte en la seva energia.

En un futur caldria repetir els assajos experimentals tenint en compte la posició i l'enfocament i veure si la variabilitat disminueix. També seria interessant fer una anàlisi més a fons de l'efecte de la posició en la forma i l'energia del píxel. Un pas més per descriure el comportament del material seria la introducció de models viscoelàstics a les simulacions que permetin modelar la variació de les propietats mecàniques amb la variable temps.

Agraïments

Per acabar aquest treball, m'agradaria dedicar aquesta pàgina a totes aquelles persones que l'han fet possible, especialment a en Miquel Casafont, tutor d'aquest projecte, per totes les hores que ha dedicat a seguir la feina feta, fer propostes i aportar idees i coneixement sobre els passos a seguir; a en Jordi Bonada per la seva tasca didàctica en molts conceptes que anteriorment eren desconeguts per mi, i en definitiva a tot el departament de Resistència de Materials de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona per facilitar-me la possibilitat de participar en aquest projecte.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] M. Casafont, J. M. Pons, J. Bonada, M. M. Pastor, F. Marimon and F. Roure, *Experimental study of the compression behavior of mask image projection based on stereolithography manufactured parts*, 8th Manufacturing Engineering Society International Conference, 2019
- [2] Rui Zou, Yang Xia, Shiyi Liu, Ping Hu, Wenbin Hou, Qingyuan Hu and Chunlai Shan, *Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material*, Composites Part B: Engineering Volume 99, 15 August 2016, Pages 506-513
- [3] John Ryan C. Dizon, Alejandro H. Espera Jr., QiyiChen and Rigoberto C. Advincula, *Mechanical characterization of 3D-printed polymers*, Additive Manufacturing Volume 20, March 2018, Pages 44-67
- [4] C. Sun, N. Fang, D.M. Wu and X. Zhang, *Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask*, Sensors and Actuators A: Physical Volume 121, Issue 1, 31 May 2005, Pages 113-120
- [5] Crivello J.V. and Reichmanis E., *Photopolymer materials and processes for advanced technologies*, Chemistry of Materials Volume 26, Issue 1, 14 January 2014, Pages 533-548
- [6] Sung Yong Hong, Ye Chan Kim, Mei Wang, Hyung-Ick Kim, Do-Young Byun, Jae-Do Nam, Tsu-Wei Chou, Pulickel M. Ajayan, Lijie Ci and Jonghwan Suhr, *Experimental investigation of mechanical properties of UV-Curable 3D printing materials*, Polymer Volume 145, 6 June 2018, Pages 88-94
- [7] Lee Y., Zhao X. G., Lee D., Kim T., Jung H. and Kim N., *Impact of UV curing process on mechanical properties and dimensional accuracies of digital light processing 3D printed objects*, Smart Structures and Systems Volume 22 No. 2, August 2018, Pages 161-166
- [8] Jiangtao Wu, Zeang Zhao, Craig M. Hamel, Xiaoming Mu, Xiao Kuang, Zaoyang Guo and H. Jerry Qi, *Evolution of material properties during free radical photopolymerization*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids Volume 112, March 2018, Pages 25-49

- [9] Alessandra Vitale, Matthew G. Hennessy, Omar K. Matar, and João T. Cabral, *Interfacial Profile and Propagation of Frontal Photopolymerization Waves*, *Macromolecules* Volume 48 No. 1, 2015, Pages 198-205
- [10] Mario Monzón, Zaida Ortega, Alba Hernández, Rubén Paz and Fernando Ortega, *Anisotropy of Photopolymer Parts Made by Digital Light Processing*, *Materials* Volume 10 Issue 64, 2017
- [11] E. Aznarte, C. Ayranci, and A.J. Qureshi, *DIGITAL LIGHT PROCESSING (DLP): ANISOTROPIC TENSILE CONSIDERATIONS*, *Solid Freeform Fabrication 2017: Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*
- [12] E. Aznarte, C. Ayranci, and A.J. Qureshi, *A study on material-process interaction and optimization for VAT-photopolymerization processes*, *Rapid Prototyping Journal* Volume 24 Issue 9, Pages 1479-1485
- [13] Bernhard Steyrer, Bernhard Busetia, György Harakály, Robert Liska and Jürgen Stampfl, *Hot Lithography vs. room temperature DLP 3D-printing of a dimethacrylate*, *Additive Manufacturing* Volume 21, May 2018, Pages 209-214
- [14] Xiao Kuang, Zeang Zhao, Kaijuan Chen, Daining Fang, Guozheng Kang and Hang Jerry Qi, *High-Speed 3D Printing of High-Performance Thermosetting Polymers via Two-Stage Curing*, *Macromolecular Rapid Communications* Volume 39 Issue 7, April 2018
- [15] Jiangtao Wu, *CONSTITUTIVE MODELING OF PHOTOPOLYMERIZATION AND ITS APPLICATION TO 3D PRINTING*, Dissertation from Georgia Institute of Technology, August 2018
- [16] J. Bonada, A. Muguruza, X. Fernández-Francos and X. Ramis, *Optimisation procedure for additive manufacturing processes based on mask image projection to improve Z accuracy and resolution*, *Journal of Manufacturing Processes* Volume 31, January 2018, Pages 689-702
- [17] Chi Zhou, Yong Chen and Richard A. Waltz, *Optimized Mask Image Projection for Solid Freeform Fabrication*, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* Volume 131 Issue 6, December 2009

- [18] Kavin Kowsari, Biao Zhang, Sahil Panjwani, Zaichun Chen, Hardik Hingorani, Saeed Akbari, Nicholas X. Fang and Qi Ge, *Photopolymer formulation to minimize feature size, surface roughness, and stair-stepping in digital light processing-based three-dimensional Printing*, Additive Manufacturing Volume 24, December 2018, Pages 627-638
- [19] Hyun-Wook Kang, Jeong Hun Park and Dong-Woo Cho, *A pixel based solidification model for projection based stereolithography technology*, Sensors and Actuators A: Physical Volume 178, May 2012, Pages 223-229
- [20] Mingjie Liu, Qi Zhang, Yiwei Shao, Chuanqi Liu and Yulong Zhao, *Research of a Novel 3D Printed Strain Gauge Type Force Sensor*, Micromachines Volume 10 Issue 1, December 2018
- [21] Dinesh K. Patel, Amir Hosein Sakhaei, Michael Layani, Biao Zhang, Qi Ge and Shlomo Magdassi, *Highly Stretchable and UV Curable Elastomers for Digital Light Processing Based 3D Printing*, Advanced Materials Volume 29 Issue 15, February 2017
- [22] Dean D., Wallace J., Siblani A., Wang M. O., Kim K., Mikos A. G. and Fisher J. P., *The calibration of continuous Digital Light Processing (cDLP) for the highly accurate additive manufacturing of tissue engineered bone scaffolds*, Virtual and Physical Prototyping Volume 7 Issue 1, March 2012
- [23] Tiller B., Reid A., Zhu B., Guerreiro J., Domingo-Roca R., Curt Jackson J. and Windmill J.F.C., *Piezoelectric microphone via a digital light processing 3D printing process*, Materials & Design Volume 165, 5 March 2019